



## รายงานฉบับสมบูรณ์

กระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่  
อุณหภูมิสูง

**Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating  
Process**

ผู้วิจัย

รศ.ดร.สุธรรม นียมวาส

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ประจำปีงบประมาณ 2554-2555..รหัสโครงการ ENG540663S

## รายงานฉบับสมบูรณ์

กระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่  
อุณหภูมิสูง

**Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating  
Process**

ผู้วิจัย

รศ.ดร.สุธรรม นียมวาส

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วันเริ่มต้นโครงการ 1 สิงหาคม 2554

วันสิ้นสุดโครงการ 31 กรกฎาคม 2556

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จลงได้ ถ้าหากคณะผู้วิจัยไม่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากเงินรายได้ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัย ในการอนุมัติทุนวิจัยนี้

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับความเอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มา ณ ที่นี้ด้วย

ปีงบประมาณที่ได้รับทุน

ปีงบประมาณ 2554-55

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อลักษณะของผิวเคลือบบนวัสดุฐานเหล็กกล้าที่ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนและกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงได้แก่ ความหนาของวัสดุฐาน ความหนาของชั้นผิวเคลือบตั้งต้น ตัวประสาน (ในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์) และระบบของสารตั้งต้นที่ใช้ โดยเมื่อความหนาของวัสดุฐานและความหนาของชั้นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ผิวเคลือบที่ได้จะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นและมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานน้อยลง เมื่อเลือกใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน และใช้ตัวประสานในสัดส่วนที่น้อยลง ผิวเคลือบที่ได้จะมีความราบเรียบสม่ำเสมอมากขึ้นและมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานที่ดีขึ้น และเมื่อเลือกใช้ส่วนผสมตั้งต้นจากระบบสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยเบดิกที่สูงขึ้น ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะมีความขรุขระมากขึ้นและเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้น้อยลง ขนาดของผงผสมตั้งต้น และระยะที่ใช้การพ่นเคลือบเป็นตัวแปรที่สำคัญในกรณีของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง โดยเมื่อใช้ระยะการพ่นเคลือบที่เหมาะสม และใช้ผงผสมตั้งต้นที่มีขนาดลดลง ผิวเคลือบที่ได้จะมีความราบเรียบและมีความแข็งแรงในการยึดเกาะที่ดี สำหรับความหนาของวัสดุฐานส่งผลคล้ายคลึงกับกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง

## **Abstract**

The purpose of this research is devoted to study the effect of the coating surface characteristic on a steel substrate that attained by the self-propagating high-temperature synthesis assisted thermal coating and flame spray coating process. The thickness of the steel substrate and pre-coating layer, binder and the precursor systems are important parameters for the self-propagating high-temperature synthesis assisted thermal coating process. When the thickness of the steel substrate and the thickness of the pre-coating layer increased, the coating is less smooth and the adhesion strength of the substrate is decreased. The coating surface displayed smooth and has good adhesion strength, with the used of trace polyvinyl alcohol as a binder. When use the precursor system that has a high adiabatic temperature, the coating surface is less smooth and has low adhesion strength. In case of the studying in the self-propagating high-temperature synthesis assisted flame spray coating process, the particle size of the precursor powder and the distance between the substrate and the flame spray nozzle are the important parameters. When set up the spray distance in the appropriate position and reduced the particle size of the precursor powder, the coating surface is smooth and has high adhesion strength. For the effect of the substrate thickness on a coating surface is similar to the previous process.

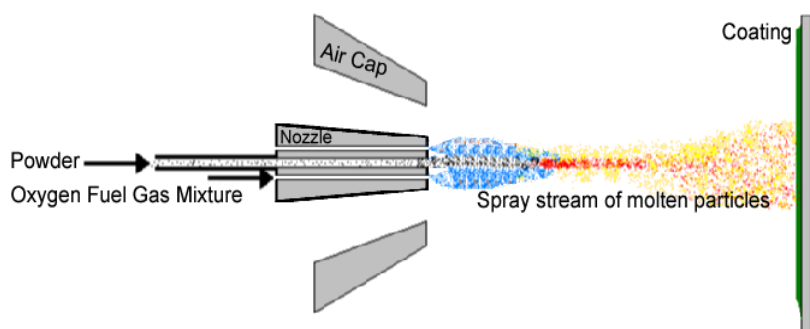
## สารบัญเรื่อง (Table of Contents)

กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อ	iv
Abstract	v
บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
ทฤษฎีและหลักการ	3
การทบทวนวรรณกรรม	12
ขอบเขตของการวิจัย	24
ระเบียบวิธีวิจัย	25
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย	34
ผลการวิจัย	
ผลการวิเคราะห์ทางอุณหภูมิศาสตร์	38
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ	40
ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ	70
สรุปผล	72
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	74
บรรณานุกรม	75

## บทนำ

วิศวกรรมพื้นผิว (surface engineering) ถือเป็นศาสตร์แห่งการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของชิ้นงานให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเดิมของเนื้อวัสดุของชิ้นงาน วิศวกรรมพื้นผิวนับได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจประเภทหนึ่ง เนื่องจากมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องการเพิ่มความสามารถให้กับชิ้นงานและงานทางด้านเครื่องจักรในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยความร้อนจัดเป็นงานวิศวกรรมพื้นผิวประเภทหนึ่งที่มีการแพร่ขยายไปอย่างรวดเร็วทั้งในประเทศและต่างประเทศทั่วโลก เนื่องจากการพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อนเป็นเทคโนโลยีการสร้างผิวเคลือบที่ทำให้ผลิตผิวเคลือบจากวัสดุได้หลายประเภท และมีคุณภาพสูงในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานในหลายสภาวะ ได้แก่ สภาวะที่มีการสึกหรอหรือการกัดกร่อน เป็นต้น โดยหลักการแล้ว การพ่นเคลือบด้วยความร้อน คือ การหลอมวัสดุเคลือบให้อยู่ในสภาวะหลอมเหลว หรือกึ่งหลอมเหลวแล้วพ่นออกไปด้วยแรงดันแก๊สเพื่อไปตกกระทบลงบนผิวชิ้นงานที่ต้องการจะเคลือบผิว นอกจากนี้แล้วเมื่อนำผิวเคลือบที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยความร้อนไปใช้งานจนเกิดการเสื่อมสภาพ หรือมีขนาดลดลงก็สามารถนำชิ้นงานนั้นๆ มาพ่นเคลือบซ้ำใหม่ได้เรื่อยๆ ข้อดีของกระบวนการนี้ก็คือ ช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตให้กับโรงงานอุตสาหกรรม การพ่นเคลือบด้วยความร้อนสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของแหล่งความร้อนที่ใช้ได้ 3 ประเภท ดังนี้ ประเภทที่อาศัยการเผาไหม้ (combustion) สองประเภทที่อาศัยการอาร์คด้วยไฟฟ้า (electric arc) และสุดท้ายประเภทที่อาศัยพลาสมา (plasma) โดยแต่ละประเภทสามารถจำแนกแยกย่อยต่อไปได้อีกตามการออกแบบปืนพ่นหรือสภาพการใช้งาน กระบวนการพ่นเคลือบประเภทต่างๆ ที่มีการใช้งานอยู่ มีดังนี้ การพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟ (flame spraying) การพ่นเคลือบประเภทที่ใช้อาร์คไฟฟ้า (arc spraying) การพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วสูง (high velocity oxy-fuel spraying) การพ่นเคลือบประเภทที่ใช้ปืนจู่ระเบิด (detonation-gun spraying) และการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้พลาสมา (plasma spraying) และจากกระบวนการพ่นเคลือบทั้งหลายที่กล่าวมานี้พบว่า กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนประเภทที่ใช้เปลวไฟ จึงถือเป็นวิวัฒนาการเริ่มแรกของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน โดยกระบวนการดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่อาศัยแหล่งความร้อนจากการเผาไหม้ (combustion) ระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน กระบวนการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟนี้สามารถนำใช้งานร่วมกับวัสดุเคลือบได้หลายประเภททั้งแบบผง แบบแท่ง และแบบลวด แก๊สเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กัน ได้แก่ อะซิทีลีน (acetylene), โพรเพน (propane), เมทิลอะเซทิลีน-โพรพาไดอิน (methyl-acetylene-propadiene, MAPP) และไฮโดรเจน (hydrogen) อุณหภูมิและลักษณะของเปลวไฟที่ได้นั้นมีความสัมพันธ์กันกับชนิดและอัตราส่วนของแก๊สเชื้อเพลิงกับออกซิเจน ซึ่งกระบวนการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟ ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่ให้ความเร็วของอนุภาคต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ

ด้วยเหตุผลนี้เองจึงถูกนำมาพัฒนาขึ้นในภายหลัง โดยในปัจจุบันนี้กระบวนการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟถูกเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า “ การพ่นเคลือบประเภทเชื้อเพลิง-ออกซิเจนความเร็วต่ำ (low velocity oxy-fuel spraying, LVOF) และถือเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ใช้งานได้ง่ายกว่ากระบวนการอื่น ได้อัตราการเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบสูง(<http://www.grad.cmu.ac.th/gradresearch> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552) จากคำกล่าวข้างต้นนี้พบว่า เมื่อทำการพ่นเคลือบด้วยความร้อนโดยเลือกใช้วัสดุเคลือบประเภทที่เป็นผง จะเป็นกระบวนการที่รู้จักกันดีในชื่อว่า “ combustion powder thermal spray process หรือ powder flame thermal spray process ” ซึ่งกระบวนการนี้ทำการพ่นโลหะหลอมเหลวลงบนผิวงาน โดยวัสดุที่ใช้ในการพ่นนั้นเป็นวัสดุแบบผงและทำให้หลอมเหลวด้วยความร้อนจากเปลวเพลิง และวัสดุที่หลอมเหลวแล้วถูกทำให้เป็นฝอยละเอียด (atomized) ด้วยอากาศ เมื่ออนุภาคละเอียดเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกระทบผิวชิ้นงานที่ได้รับการเตรียมมาอย่างดีแล้ว ก็จะเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ก่อตัวเป็นชั้นเคลือบหรือชั้นเคลือบบนผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพหลักการทำงานของ Combustion Powder Thermal Spray Process (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

กระบวนการนี้จึงจัดว่าเป็น “ กระบวนการแบบเย็น (cold process) ” เนื่องจากผิวชิ้นงานถูกรักษาให้มีอุณหภูมิต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางวัสดุและการเสียรูป (distortion) ของชิ้นงาน และกระบวนการนี้มีข้อดี ก็คือ สามารถให้ผิวเคลือบที่หลากหลายได้ เนื่องจากวัสดุเคลือบที่ใช้ในกระบวนการอยู่ในรูปแบบของผงละเอียด ซึ่งสามารถนำมาผสมกันด้วยส่วนผสมต่างๆ ได้ (สิทธิชัย 2547)

ด้วยความสามารถของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนประเภทเปลวไฟดังข้างต้น ได้เกิดแนวคิดที่จะนำกระบวนการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการพ่นเคลือบผิวด้วยผงวัสดุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ และสามารถขยาย ลูกกลมต่อไปได้ หรือที่เรียกว่า กระบวนการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง แล้วจึงตกลงไปกระทบกับผิวของชิ้นงาน กลายเป็น

ผิวเคลือบ โดยการจุดระเบิดจะอาศัยเปลวไฟที่เกิดจากหัวพ่นของแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งโครงการวิจัยนี้อาจก่อประโยชน์แก่ภาคอุตสาหกรรม ในแง่ของต้นทุนการนำเข้าการผลิต และการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุต่อไป

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- สามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบอะลูมินาจากวัสดุผง  $Fe_2O_3+Al$  ได้ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating Process)
- ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการสังเคราะห์ที่มีต่อผิวเคลือบ
- ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผิวเคลือบด้วยเครื่อง XRD และ SEM
- ทดสอบสมบัติทางกลของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้

### ทฤษฎีและหลักการ

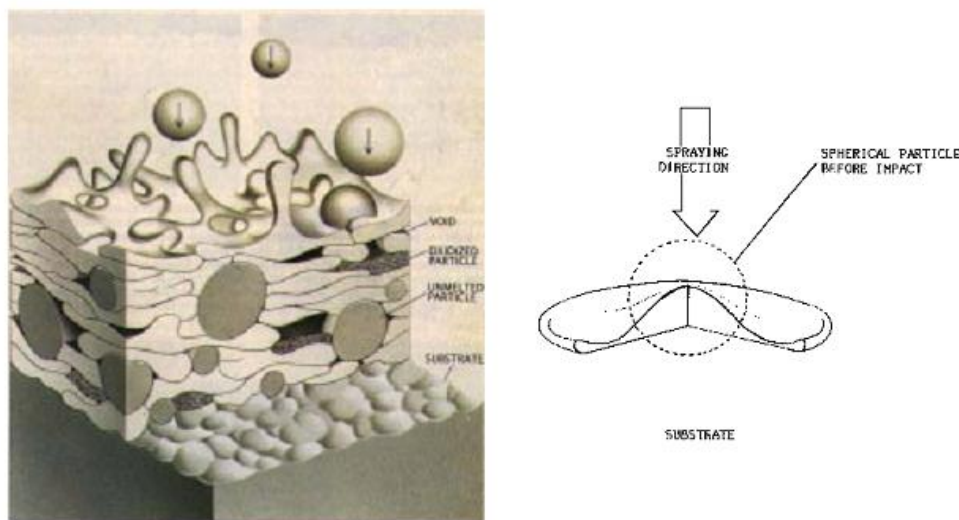
#### กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (thermal spray coating) เป็นกระบวนการทางวัสดุศาสตร์ที่มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการหลักของกระบวนการนี้คือการพ่นวัสดุที่หลอมเหลวให้วิ่งไปกระทบและประสานเข้ากับผิวของชิ้นงาน โดยวัสดุที่ใช้พ่นถูกทำให้หลอมเหลวด้วยความร้อนจากการเผาไหม้ (combustion) หรือพลาสมา (plasma) ที่เกิดจากการอาร์คด้วยกระแสไฟฟ้า วัสดุที่ใช้เคลือบอาจจะเป็นโลหะบริสุทธิ์ โลหะผสม และตลอดจนวัสดุประเภทเซรามิก หรือโลหะผสมเซรามิก (cermets) โดยอาจจะอยู่ในรูปแบบของผงวัสดุ หรือในรูปแบบของเส้นลวด วัสดุที่หลอมเหลวจะถูกเร่งด้วยเปลวเพลิงหรืออากาศอัดให้วิ่งไปกระทบผิวงาน (substrate) ด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการฝังตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว (rapid solidification) ชั้นเคลือบ (sprayed deposit) ที่ได้จึงมีโครงสร้างของเกรนที่ละเอียดมาก (ultra-fine grain)

กระบวนการหรือเทคนิคการพ่นเคลือบด้วยความร้อนมีประวัติของการพัฒนามายาวนานกว่า 40 ปี แต่เทคโนโลยีนี้มีความก้าวหน้าอย่างมากในระยะ 10 ปีที่ผ่านมาด้วยการพัฒนาเทคนิคการพ่นเคลือบใหม่ๆ จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ตั้งแต่อุตสาหกรรมเครื่องยนต์ กังกันแก๊ส (gas turbine technology) ไปจนกระทั่งถึงอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วัตถุประสงค์หลักๆ ของการใช้เทคโนโลยีการพ่นเคลือบ ได้แก่ การป้องกันการกัดกร่อน (corrosion protection) เพิ่มความนำไฟฟ้า

(conductivity) เพิ่มความทนทานต่ออุณหภูมิสูง เพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอเนื่องจากการเสียดสีหรือการกัดกร่อน (fretting wear, erosion, etc) และเพิ่มการป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) เป็นต้น

หลักการการทำงานของกระบวนการนี้ คือ การทำให้วัสดุที่ถูกพ่น (อาจเป็นผงหรือเส้นลวด) เกิดการหลอมตัว จากนั้นจึงเร่งให้อนุภาคของวัสดุหลอมเหลวนั้นเคลื่อนที่ไปปะทะกับผิวงานที่ต้องการเคลือบ ซึ่งในขณะเดียวกันนั้นจะเกิดการแข็งตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแหล่งความร้อนและวิธีการเร่งจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น ณ บริเวณผิวที่ถูกพ่นเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการพ่นเคลือบด้วยความร้อน (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนถูกแยกประเภทไปตามลักษณะของวัสดุผง (ผงหรือลวด) และแหล่งความร้อน ได้ดังนี้ และแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3

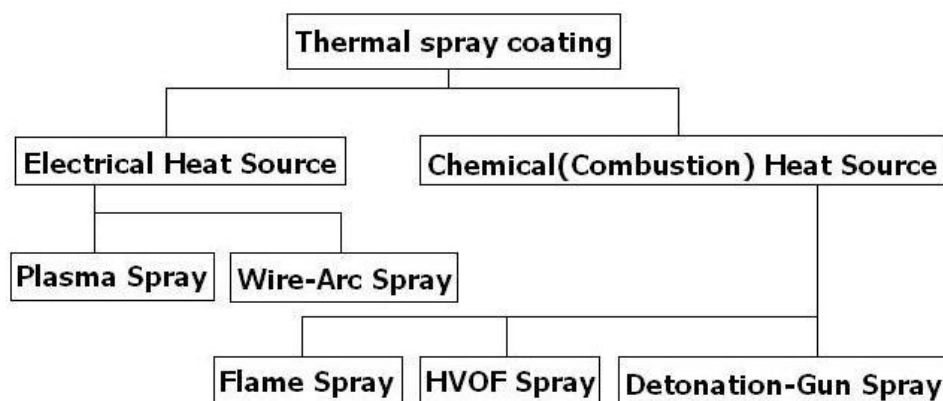
(1) แหล่งความร้อนจากการเผาไหม้

- Combustion flame spray
- Detonation gun spray
- High velocity oxy-fuel (HVOF) spray

(2) แหล่งความร้อนจากไฟฟ้า

- Two wire electric arc spray
- Plasma spray ซึ่งแบ่งได้เป็น Air plasma spray (APS) และ Vacuum plasma spray

(VPS or LPPS)



รูปที่ 3 แผนภาพจำแนกประเภทของการพ่นเคลือบด้วยความร้อน (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

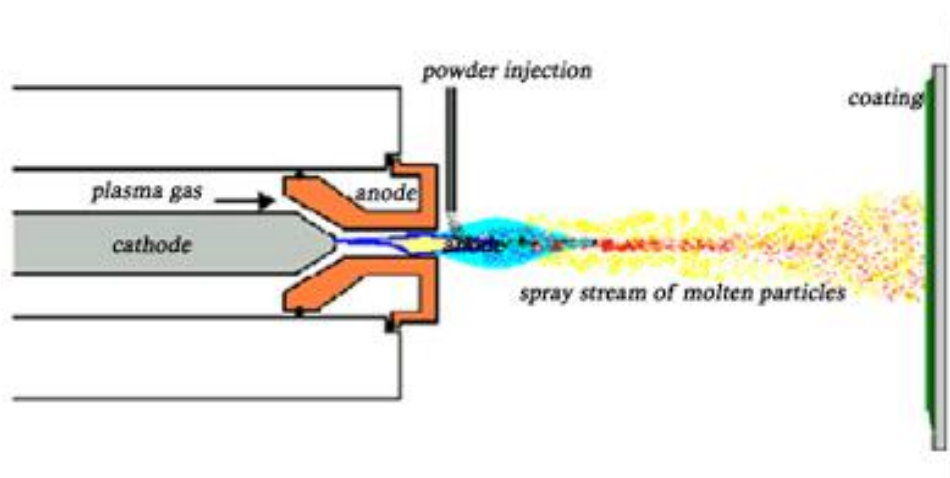
### Combustion powder thermal spray process

Combustion powder thermal spray process บางครั้งจะรู้จักกันในชื่อว่า Powder flame thermal spray process หรือ LVOF (low velocity oxygen fuel process) กระบวนการนี้ทำการพ่นโลหะหลอมเหลวลงบนผิวชิ้นงาน (ดังแสดงในรูปที่ 1) ซึ่งวัสดุที่ใช้พ่นจะเป็นแบบผง ผงโลหะถูกทำให้หลอมเหลวด้วยความร้อนจากเปลวเพลิง (ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ของ oxy -acetylene) และผงที่หลอมเหลวแล้วจะถูกทำให้เป็นฝอยละเอียด (atomized) ด้วยการอัดอากาศเช่นเดียวกับ Combustion wire thermal spray เมื่ออนุภาคละเอียดเหล่านี้วิ่งไปกระทบผิวชิ้นงานที่ได้รับการเตรียมอย่างดีแล้ว ก็จะเกิดการยึดตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ก่อตัวเป็นชั้นเคลือบบนผิวชิ้นงาน กระบวนการนี้จัดว่าเป็น “ กระบวนการแบบเย็น (cold process) ” เนื่องจากผิวชิ้นงานถูกรักษาให้มีอุณหภูมิต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางวัสดุและการเสียรูป (distortion) ของชิ้นงาน

### Plasma thermal spray process

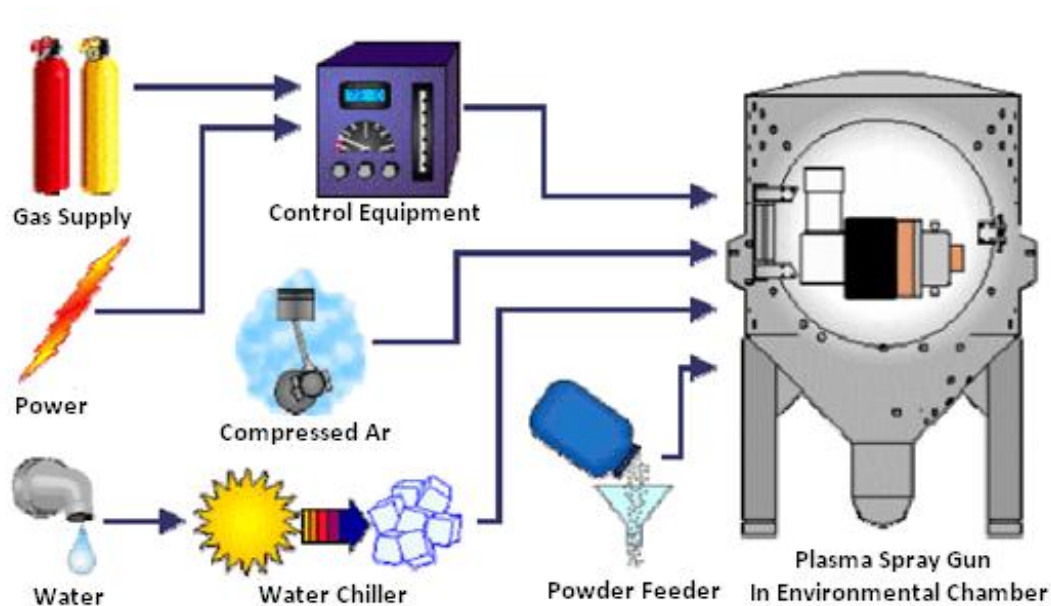
Plasma thermal spray process จัดว่าเป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่มีความซับซ้อนกว่ากระบวนการอื่นๆ ลักษณะของปืนพ่น (ดังแสดงในรูปที่ 4) ประกอบด้วยแอโนด (anode) ที่ทำด้วยทองแดงและแคโทดที่ทำด้วยทังสเตนซึ่งหล่อเย็นด้วยน้ำทั้งคู่ โครงสร้างของแอโนดและแคโทดนี้จะถูกออกแบบให้มีรูปร่างเพื่อใช้เป็นหัวพ่นได้ และอยู่ภายในลำกล้องของปืนพ่นแก๊สพลาสมา (ได้แก่ อาร์กอน (Ar) ไนโตรเจน (N) ไฮโดรเจน (H) ฮีเลียม (He) ) จะไหลผ่านลำกล้องและช่องว่างระหว่างแอโนดกับแคโทด

ด้วยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองเป็นผลให้เกิดมีสภาพนำไฟฟ้า และเกิดอาร์คไฟฟ้ากระแสตรง (DC arc) ที่มีความร้อนสูงทำให้อุณหภูมิของแก๊สเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา พลาสมาเมื่อเคลื่อนที่ออกจากหัวพ่น จะกลายเป็นพลาสมาอิสระหรือพลาสมาที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน พลาสมาที่ทางออกนี้อาจมีอุณหภูมิสูงมากถึงประมาณ 15,000 K สำหรับปืนพ่นที่ใช้กำลังไฟฟ้า 40 kW ผงวัสดุที่ใช้พ่นเคลือบจะถูกส่งเข้าไปในพลาสมาที่ปากทางออกของหัวพ่น ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด และผงวัสดุจะหลอมเหลวและถูกเร่งให้มีความเร็วสูง (100-300 m/s) เข้าไปกระทบบนผิวชิ้นงานและเย็นตัวอย่างรวดเร็วเช่นกัน



รูปที่ 4 แผนภาพหลักการทำงานของ Plasma thermal spray process (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

กระบวนการพ่นเคลือบประเภทพลาสมาที่ใช้กันทั่วไปมักจะทำงานภายใต้บรรยากาศ และเรียกกันว่า “ Air plasma spray (APS) ” ส่วนกระบวนการพ่นเคลือบประเภทพลาสมาที่ทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่ถูกควบคุม หรือภายในห้องความดันต่ำซึ่งบรรจุด้วยแก๊สเฉื่อย จะมีชื่อเรียกว่า “ Vacuum plasma spray (VPS) หรือ Low pressure plasma spray (LPPS) ” ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพหลักการทำงานของ Low pressure plasma thermal spray process (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

ข้อดีของกระบวนการพ่นเคลือบประเภทพลาสมา คือ สามารถเลือกใช้วัสดุเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ เช่น ทังสแตนและเซรามิก ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการนี้ จะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงดีกว่ากระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนประเภทอื่นๆ ยกเว้นกระบวนการ HVOF และกระบวนการ Detonation

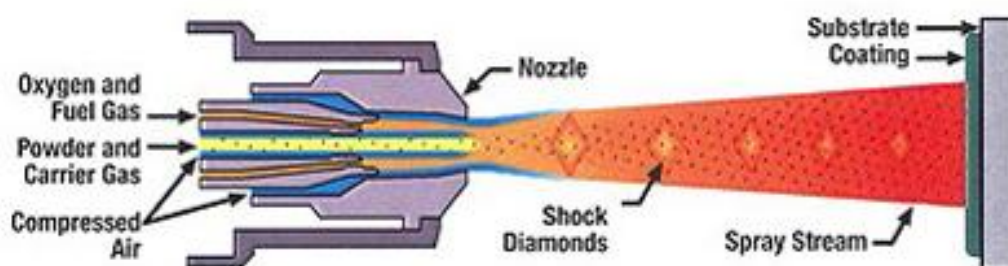
กล่าวได้ว่า กระบวนการพ่นเคลือบประเภทพลาสมาเป็นกระบวนการที่มีช่วงการใช้งานกว้างที่สุด และมีลักษณะที่เอนกประสงค์มากที่สุดด้วย

อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ก็มีข้อเสียเช่นกัน นั่นคือ ต้องการการลงทุนที่สูงมาก และความซับซ้อนเป็นอย่างมากของระบบการทำงาน ดังนั้นผู้ที่สามารถใช้งานระบบได้จะต้องมีความชำนาญเป็นอย่างมาก

### HVOF (high velocity oxygen fuel) thermal spray process

กระบวนการนี้มีพื้นฐานการทำงานเช่นเดียวกับ combustion powder spray process (LVOF) แต่ต่างกันที่มีการพัฒนาให้เปลวความร้อนและวัสดุเคลือบมีความเร็วสูงขึ้นมา โดยปืนพ่นที่ใช้ในกระบวนการ HVOF มีอยู่หลายแบบ แต่ละแบบจะใช้งานด้วยวิธีการที่ต่างกันเพื่อทำให้เกิดความเร็วที่สูง วิธีการหนึ่งที่จะแนะนำในที่นี้ ได้แก่ การใช้ห้องเผาไหม้ความดันสูงที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำและมีหัวพ่นที่

ยาว (long nozzle) เชื้อเพลิง (น้ำมันก๊าด อะเซทิลีน โพรพิลีน และไฮโดรเจน) และออกซิเจนจะถูกส่งเข้าไปในห้องเผาไหม้ การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีความรุนแรงพอที่จะทำให้เกิดเปลวไฟที่ให้อุณหภูมิและความดันที่สูง และถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปตามหัวพ่น ซึ่งความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ผงวัสดุอาจถูกป้อนเข้าไปตามแนวแกนของหัวพ่น หรือในกรณีของหัวพ่นแบบ laval จะถูกป้อนเข้าจากด้านข้างที่มีความดันต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพหลักการทำงานของ HVOF (High velocity oxygen fuel) thermal spray process

(<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ HVOF มีสมบัติเหมือนกับชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ Detonation กล่าวคือ มีความหนาแน่นสูง ความแข็งแรงสูง มีความเค้นดึงตกค้าง (residual tensile stress) ต่ำ และส่วนใหญ่มักจะเป็นความเค้นอัด (compression stress) ซึ่งช่วยให้สามารถพ่นเคลือบให้มีความหนาหลายๆ ได้

ด้วยเหตุที่อนุภาคของวัสดุมีพลังงานจลน์สูงมาก จึงไม่มีความจำเป็นต้องให้อนุภาคเหล่านี้หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์ อนุภาคเหล่านี้ก็สามารถยึดเกาะกับผิววัสดุได้ด้วยการปะทะอย่างรุนแรงและส่วนหนึ่งฝังตัวภายใต้ผิวชิ้นงาน และด้วยสมบัติพิเศษนี้เองทำให้กระบวนการ HVOF สามารถพ่นเคลือบวัสดุโลหะผสมเซรามิกจำพวกคาร์ไบด์ได้ รูปที่ 7 แสดงถึงลักษณะการพ่นเคลือบด้วยระบบ HVOF



รูปที่ 7 ลักษณะการพ่นเคลือบด้วยระบบ HVOF (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

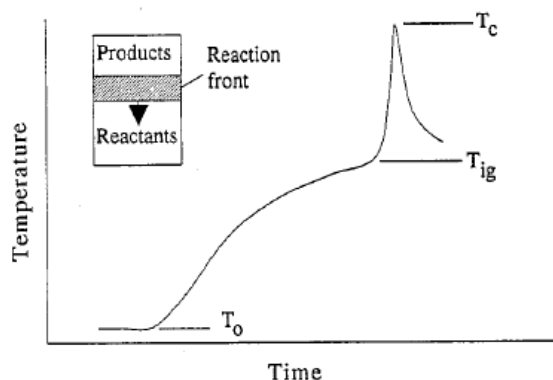
ชั้นเคลือบที่ได้จากกระบวนการ HVOF มีลักษณะที่ดีหลายประการ ดังนี้

- ทนทานต่อการกัดกร่อน (erosion and corrosion resistance)
- ทนทานต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการขัดหรือสี (wear resistance)
- ผิวเคลือบมีความหนาแน่นสูง หรือ ไม่มีรูพรุน
- มีความแข็งสูง
- ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ (<http://www.5tigers.co.th> สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2552)

### การสังเคราะห์สารโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Self-propagating High Temperature synthesis: SHS)

โดยปกติกระบวนการ SHS จะเกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาของผงวัสดุอัดแน่นที่ประกอบไปด้วยสารตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยที่มีการจุดระเบิด ผงวัสดุอัดที่ปลายด้านหนึ่ง แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่เพียงพอต่อการเผาไหม้ขยายและลุกลามต่อไปทั้งชิ้นงาน ซึ่งความร้อนของปฏิกิริยามีผลมาจากค่าความแตกต่างปริมาณมากของเอนทัลปีของตัวทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์

กระบวนการ SHS เริ่มต้นที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น ( $T_0$ ) ถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการจุดระเบิด ( $T_{sp}$ ) ซึ่งก็คือจุดที่กระบวนการไม่ต้องการพลังงานเพิ่มเติมในการทำปฏิกิริยาแต่การเคลื่อนไหวของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยอุณหภูมิทางทฤษฎีสูงสุดของปฏิกิริยาหรือเรียกว่าอุณหภูมิแอดิเบติก ( $T_{ad}$ ) เกิดขึ้นภายใต้สมมติฐานการไม่สูญเสียความร้อนของปฏิกิริยาสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ในความเป็นจริงค่าอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยา ( $T_c$ ) จะมีค่าต่ำกว่า  $T_{ad}$  เสมอ โดยปกติการเตรียมผงอัดของสารตั้งต้นจะกระทำภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $T_0$  ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่างๆ นี้กับเวลาได้แสดงไว้ในรูปที่ 8

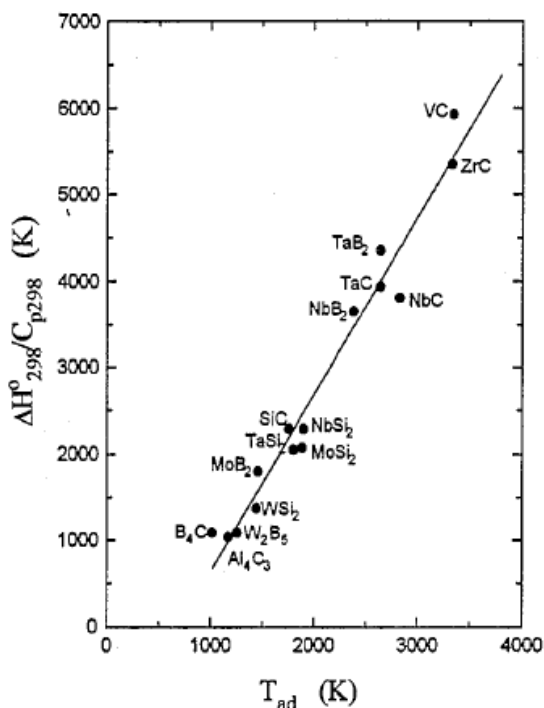


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาสำหรับกระบวนการ SHS (Moore et al. 1995)

การคำนวณค่า  $T_{ad}$  ภายใต้สภาวะแอดิเยแบติก สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของเอนทัลปีของการก่อรูป (enthalpy of formation:  $\Delta H_T^\circ$ ) ของสารประกอบ ดังแสดงในสมการที่ 1 (Seungwon et al. 1996)

$$-\Delta H_T^\circ = H_{T_{ad}} - H_T = \int_T^{T_{ad}} nC_p dT \quad (1)$$

โดยปกติค่า  $T_{ad}$  จากปฏิกิริยาของระบบสารต่างๆ ที่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการ SHS จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1000 – 4000 K และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{ad}$  และ  $\Delta H_{298}^\circ/C_p$  ดังรูปที่ 9

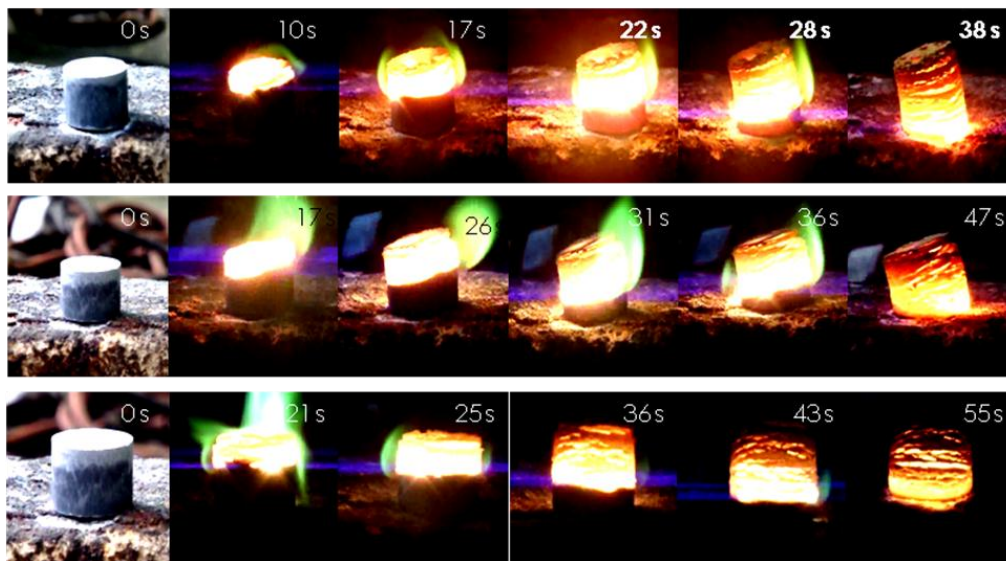


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{ad}$  และ  $\Delta H_{298}^{\circ}/C_p$  ของสารบางชนิดที่ผลิตโดย SHS (Seungwon et al. 1996)

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนเฟสในผลิตภัณฑ์ก่อนที่ขึ้นงานจะมีอุณหภูมิถึง อุณหภูมิเอเชียเบติก สมการที่ 1.1 จะมีการเพิ่มเทอมของความร้อนแฝงของการเปลี่ยนเฟส ดังแสดงในสมการที่ 2 (Seungwon et al. 1996)

$$\Delta H_T^{\circ} + \int_T^{T_{ad}} \sum n C_p dT + \sum n L = 0 \quad (2)$$

โดย  $n$  คือจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้  $C_p$  คือค่าความจุความร้อน  $L$  คือค่าเอนทาลปีของการเปลี่ยนเฟส ส่วนค่าความร้อนของการก่อรูป ( $\Delta H_T^{\circ}$ ) ที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งปกติมักจะใช้  $T = 298 \text{ K}$  แต่ก็สามารถคำนวณที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้ตามต้องการ ดังนั้นการคำนวณ สมการที่ 2 จะสามารถบอกค่า  $T_{ad}$  ที่ อุณหภูมิ  $T$  ตามต้องการ ซึ่งถึงแม้  $T_{ad}$  ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาจริง แต่ผลการคำนวณสามารถเป็นกรณีบอกค่าอุณหภูมิของระบบที่จะทำการศึกษาและเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ ทั้งนี้ระบบที่มีค่า  $T_{ad} > 1800^{\circ}\text{C}$  จะสามารถเกิดปฏิกิริยาค้ำหน้าด้วยตัวเองจนตลอดทั้งชิ้นงาน ภายหลังจากจุดระเบิด (Seungwon et al. 1996) ดังแสดงในรูปที่ 10 แต่ถ้า  $T_{ad} < 1800^{\circ}\text{C}$  ชิ้นงานจะต้องได้รับการอุ่นจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนที่จะจุดระเบิดให้ขึ้นงาน



รูปที่ 10 ลักษณะการเผาไหม้ของสารในระบบ SHS (ธวัช 2552)

### การทบทวนวรรณกรรม

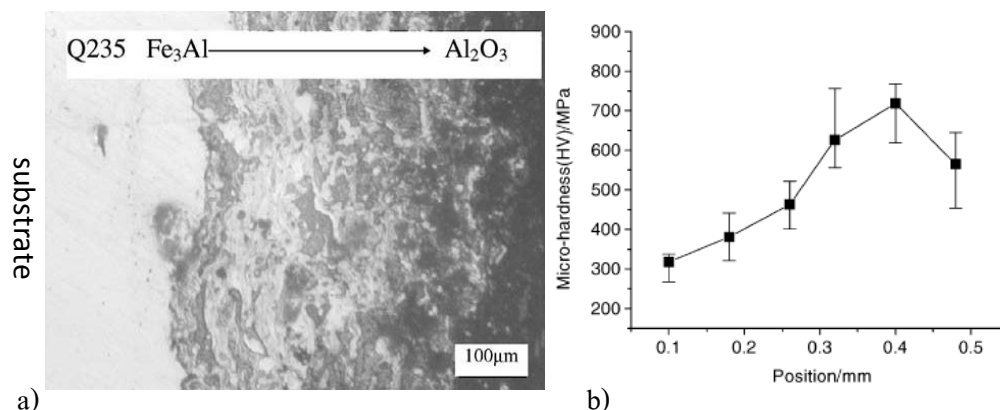
กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงนี้ ถือเป็นกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่มีการพัฒนามาจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนหลายกระบวนการด้วยกัน ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา ถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงนี้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนสูง จึงถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวสูงจำพวกเซรามิก และวัสดุผสมเซรามิกได้ ดังเช่นในงานวิจัยของ Zhang และคณะที่ทำการศึกษาถึงกระบวนการและสมบัติของผิวเคลือบ  $Fe_3Al - Al_2O_3$  ในกระบวนการสังเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้คือ  $Fe_3Al$  ที่ผ่านการบดเชิงกล (mechanical alloying) มาก่อน จากนั้นจึงนำมาผสมกับผงอะลูมินาอีกครั้ง แล้วนำผงผสมตั้งต้นที่เตรียมขึ้นนี้ไปพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมาลงบนผิวชิ้นงานตัวอย่างเป็นชิ้นๆ โดยมีส่วนประกอบของแต่ละชั้นดังตารางที่ 1 แล้วนำผิวเคลือบที่ได้นี้ไปทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะ (adhesion strength) ถ่ายภาพลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (micro hardness) และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลัน (thermal shock resistance)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบของ Zhang และคณะ

Spray parameters						
Layer number	Coating material	Plasma power (kW)	Spray distance (mm)	Plasma gas flow (l/min)	Carrier gas flow (l/min)	Powder feed rate (g/min)
1	Fe <sub>3</sub> Al	15	90	40(argon) + 4(hydrogen)	15	35
2	Fe <sub>3</sub> Al-25 wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18	90	40(argon) + 4(hydrogen)	15	35
3	Fe <sub>3</sub> Al-50 wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	90	45(argon) + 5(hydrogen)	15	35
4	Fe <sub>3</sub> Al-75 wt.% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32	90	48(argon) + 5(hydrogen)	15	35
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35	90	48(argon) + 5(hydrogen)	15	35

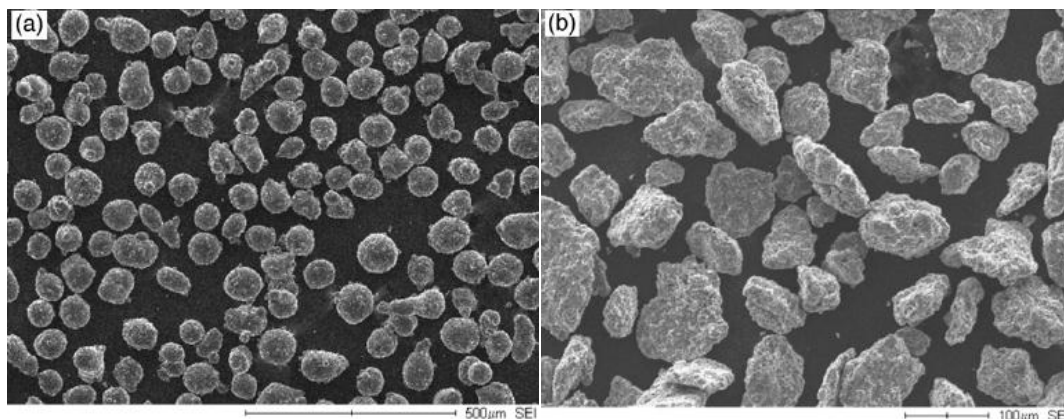
จากผลการทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะสูงกว่าผิวเคลือบอะลูมินา และจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ ทำให้ทราบว่าผิวเคลือบที่มีปริมาณอะลูมินาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อวิเคราะห์ผลในตำแหน่งการวัดที่ไกลออกไปจากวัสดุฐานดังแสดงในรูปที่ 11 และเมื่อทำการวัดค่าความแข็งของผิวเคลือบพบว่า ปริมาณของอะลูมินาภายในผิวเคลือบแปรผันตรงกับความแข็งของผิวเคลือบ แต่ ณ จุดที่ผิวเคลือบมีเพียงปริมาณของอะลูมินา ผิวเคลือบก็จะมีค่าความแข็งที่ลดน้อยลงและมีสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดีกว่าผิวเคลือบอะลูมินา



รูปที่ 11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาค (a) และความแข็งของผิวเคลือบ (b) (Zhang et al. 2003)

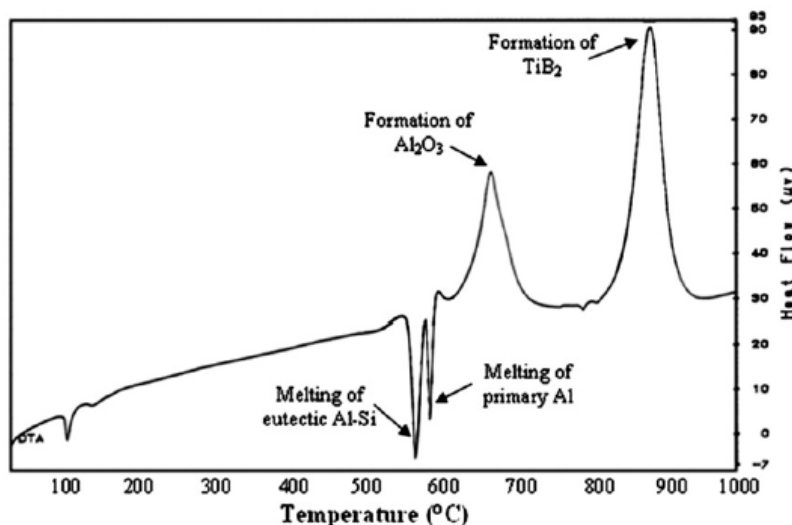
ในต่อมาได้มีผู้ศึกษาถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา นั่นคือ Tekmen และคณะ และ Kumar และ Selvarajan โดย Tekmen และคณะได้ศึกษาปฏิกิริยาการก่อรูประหว่าง TiB<sub>2</sub> และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา เขาเริ่มต้นการศึกษาด้วยการออกแบบวัสดุที่ใช้สำหรับการศึกษาปฏิกิริยาดังกล่าว โดยอาศัยปฏิกิริยา  $10\text{Al}(\text{-Si}) + 3\text{TiO}_2 + 3\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 5\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{TiB}_2 + \text{Si}$  จากนั้นเมื่อได้ระบบตามที่ต้องการแล้ว จึงสังเคราะห์ตามอัตราส่วนตั้งสมการของปฏิกิริยา บดผสมเชิงกล และร้อนผ่านตะแกรงร้อน เพื่อเลือกใช้ผงผสมตั้งต้นที่มีขนาด 38-100

$\mu\text{m}$  นำผงผสมตั้งต้นที่เตรียมได้นี้ไปวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง differential thermal analysis (DTA) และพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา แล้วนำผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ ไปวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) และทดสอบความแข็งในระดับจุลภาค ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผง Al-12Si ก่อนผ่านการบดผสมเชิงกล (a) และผงผสมตั้งต้น Al-12Si/TiO<sub>2</sub>/B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> หลังผ่านการบดผสมเชิงกล (b) (Tekmen et al. 2008)

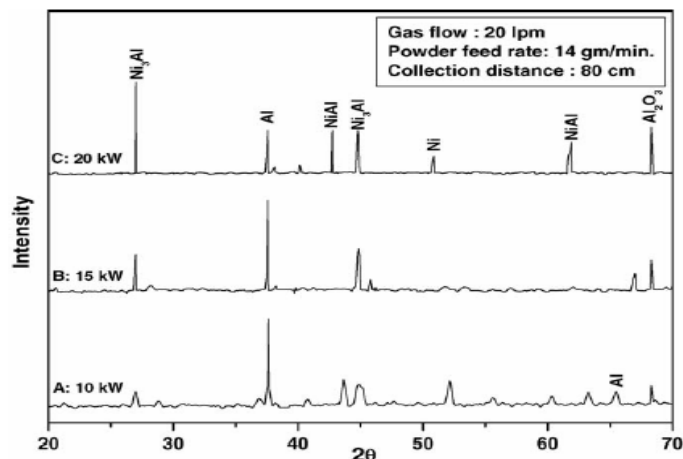
จากผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนของผงผสมตั้งต้นพบว่า ผงผสมตั้งต้นมีปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic reaction) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 580 °C และ 590 °C แสดงว่าผงผสมตั้งต้นนั้นมีการหลอมเหลวของ Al-Si และ Al เกิดขึ้นตามลำดับ และมีปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) ที่อุณหภูมิ 660 °C และ 880 °C ซึ่งแสดงถึงการก่อรูปของอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB<sub>2</sub>) ตามลำดับดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของผสมตั้งต้นหลังผ่านการบดผสมเชิงกล (Tekmen et al. 2008)

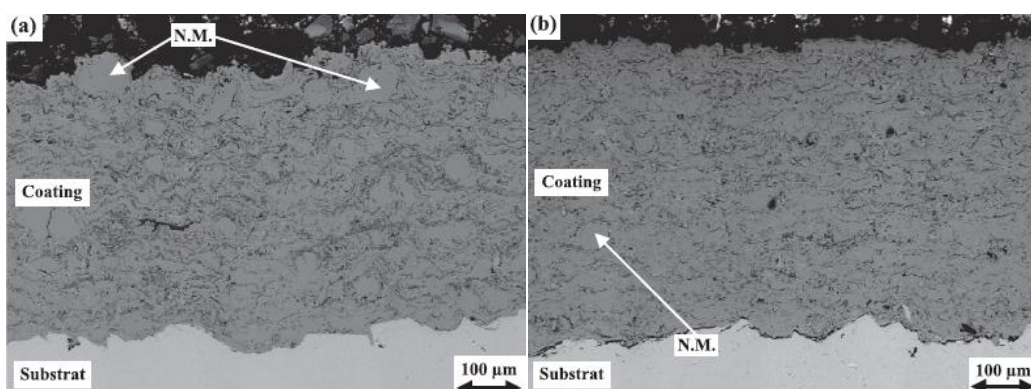
ผลการวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์พบว่า ผิวเคลือบที่ได้ประกอบด้วยอะลูมินาและไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด พบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีบางส่วนที่ไม่หลอมเหลว มีรูพรุนน้อย และมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 200  $\mu\text{m}$  และพบว่า ค่าความแข็งของผิวเคลือบจะมีค่าสูงสุด เมื่อทำการพ่นเคลือบด้วยกระแสการอาร์คที่ 400 A (Tekmen et al. 2008)

Kumar และ Selvarajan ศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะเกิดการก่อรูปและลักษณะเฉพาะของผง निकเกิลอะลูมิเนียม (NiAl) เริ่มต้นการวิจัยโดยการนำผง निकเกิลและผงอะลูมิเนียมในอัตราส่วน 85% : 15% โดยน้ำหนัก แล้วทำการพ่นเคลือบโดยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมาเช่นเดียวกัน และจากผลการวิเคราะห์สารประกอบของผิวด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ค พิกของสารประกอบที่วิเคราะห์ได้จะเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น (ดังรูปที่ 14) เมื่อพิจารณาถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่า ภายในผสมตั้งต้นผง निकเกิลจะมีขนาดเล็กกว่าผงอะลูมิเนียม (จากการคำนวณผสมตั้งต้นจะต้องมีผง निकเกิลที่มีขนาดเล็กกว่าผงอะลูมิเนียม) และจากการศึกษานี้พบว่า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ค จะทำให้ได้ผิวเคลือบที่แตกต่างกัน นั่นคือ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ค จะช่วยให้ผิวเคลือบมีความเรียบ (smooth) มากขึ้น



รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของผิวเคลือบที่ใช้กำลังไฟฟ้าในการอาร์คที่แตกต่างกัน (Kumar et al. 2006)

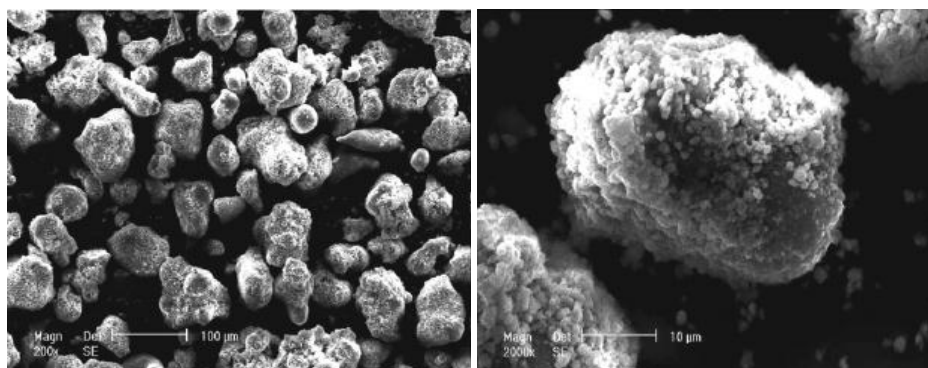
กระบวนการพ่นเคลือบแบบ HVOF Ji และคณะได้ศึกษาลักษณะการพอกและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของผิวเคลือบเหล็กอะลูมิเนียมไนต์ที่มีโครงสร้างผลึกระดับนาโน (แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น) เขาเตรียมวัสดุคิบตั้งต้นสำหรับการพ่นเคลือบด้วยวิธีการอะตอมไมเซชันและใช้เวลาคงนาน โดยวัสดุคิบตั้งต้นดังกล่าวมีส่วนประกอบดังนี้  $\text{Fe} + 40 \text{ at.}\% \text{Al} + 0.05 \text{ at.}\% \text{Zr} + 50 \text{ ppm B}$  นำวัสดุคิบตั้งต้นไปพ่นเคลือบลงบนผิวชิ้นงานที่เป็นอะลูมิเนียม เพื่อให้มีความหนาประมาณ  $300 - 400 \mu\text{m}$  จากนั้นนำผิวเคลือบที่ได้ขึ้นไปศึกษาลักษณะเฉพาะ ดังรูป ที่ 15



รูปที่ 15 ภาพถ่ายของผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาด (a) ผิวเคลือบที่ใช้วัสดุคิบตั้งต้นที่มีขนาด  $63 - 40 \mu\text{m}$  และ (b) ผิวเคลือบที่ใช้วัสดุคิบตั้งต้นที่มีขนาด  $40 - 20 \mu\text{m}$  (Ji et al. 2005)

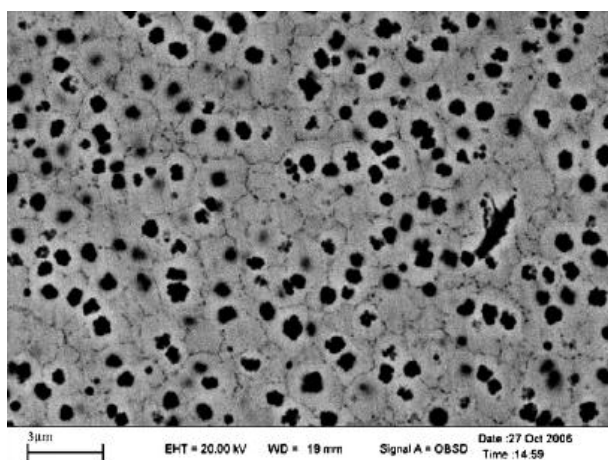
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดข้างต้นพบว่า เมื่อใช้วัตถุดิบตั้งต้นที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีส่วนที่หลอมเหลวไม่สมบูรณ์น้อยกว่า เป็นผลเนื่องมาจากวัตถุดิบตั้งต้นที่มีขนาดเล็กนั้น มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาขณะทำการพ่นเคลือบมากกว่าวัตถุดิบตั้งต้นที่มีขนาดใหญ่กว่า (Ji et al. 2005)

กระบวนการพ่นเคลือบแบบต่างๆ ที่อาศัยเทคนิค SHS โดยหลักๆ แล้วในปัจจุบันจะมีเพียงสองประเภทการพ่นเคลือบด้วยความร้อนเท่านั้นที่นำมาใช้ร่วมกับเทคนิค SHS นั่นคือ การพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมา และแบบใช้เปลวไฟ จะกล่าวถึงส่วนของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบพลาสมาที่อาศัยเทคนิค SHS ก่อน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ศึกษากันแพร่หลายมากกว่า ดังในงานวิจัยของ Dong และคณะ และ Wang และคณะ โดยงานวิจัยของ Dong และคณะจะศึกษาถึงการเตรียมผิวเคลือบวัสดุผสมจากผงผสมตั้งต้น  $Fe_2O_3$ -Al ทำการศึกษาโดยการเตรียมผงผสมตั้งต้นจากการนำผงเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และผงอะลูมิเนียม ที่มีขนาด 30  $\mu m$  และ 50  $\mu m$  ตามลำดับ ผสมให้เข้ากันและคัดขนาดให้อยู่ในช่วง - 80 + 200 เมช เพื่อคัดขนาดของผงผสมตั้งต้น นำผงผสมตั้งต้นไปพ่นเคลือบลงบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อให้ได้ผิวเคลือบวัสดุผสม แล้วนำผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาลักษณะเฉพาะ จากภาพลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงผสมตั้งต้น พบว่า ผิวของอนุภาคอะลูมิเนียมทุกอนุภาคมีบางส่วนถูกห่อหุ้มด้วยอนุภาคของเหล็กออกไซด์ ผงผสมตั้งต้นส่วนใหญ่จึงเหมาะที่จะเกิดปฏิกิริยา  $Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow 2Fe + Al_2O_3$  ขึ้น แต่เมื่อมีผงอะลูมิเนียม และผงเหล็กออกไซด์มากเกินไป บางส่วนก็จะก่อรูปเป็นเฟสระหว่างกลาง (intermediate)  $FeAl_2O_4$   $FeAl$  และ  $Fe_3Al$  สุดท้ายจึงได้ผิวเคลือบที่มีหลายเฟสประกอบกัน และผลการทดสอบความแข็งด้วยวิธีวิกเกอร์ พบว่า เฟสที่แข็งที่สุดคือ เฟสอะลูมินา (1310 HV0.1) และรองลงมาคือเฟส  $FeAl_2O_4$  และเฟสที่เป็นโลหะและโลหะผสมตามลำดับ (Dong et al. 2004) ดังรูปที่ 16



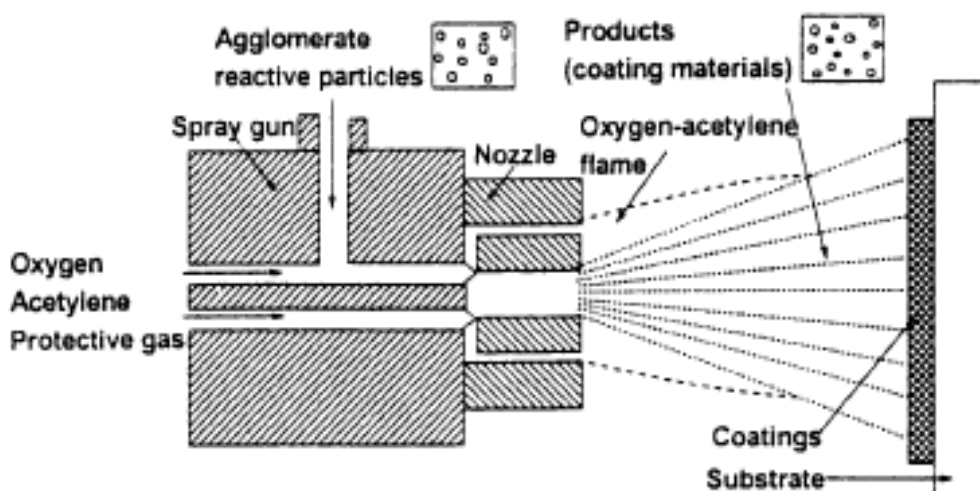
รูปที่ 16 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผงผสมตั้งต้นที่ใช้ในระบบการพ่นเคลือบ (Dong et al. 2004)

ส่วนงานวิจัยของ Wang และคณะศึกษาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบวัสดุผสม เซรามิกจากผง Fe - Ti - C และใช้ซุโครสเป็นสารตั้งต้นที่ให้คาร์บอนแก่ระบบ โดยเริ่มจากการเตรียมผงผสมตั้งต้นจากการบดผสมผงเฟอร์ไรท์ไทเทเนียม (FeTi) ที่มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 5  $\mu\text{m}$  และซุโครสให้เข้ากันในแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบแห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง สังเคราะห์ด้วยความร้อนเพื่อให้ซุโครสเปลี่ยนเป็นคาร์บอนอย่างสมบูรณ์ และนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบเหวี่ยง เพื่อให้ได้ผงที่มีขนาดประมาณ 40 - 60  $\mu\text{m}$  (ควรใช้ระบบการสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนอะตอมของไทเทเนียมต่อคาร์บอนเป็น 1:1) นำผงผสมตั้งต้นไปพ่นเคลือบลงบนผิวชิ้นงาน และนำผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษา ลักษณะเฉพาะทำให้ทราบว่า ผงผสมตั้งต้นที่เตรียมได้นั้นมีโครงสร้างที่พิเศษ คือ อนุภาคเฟอร์ไรท์ไทเทเนียมที่มีขนาดเล็กมากถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคของคาร์บอนที่ถูกเปลี่ยนมาจากซุโครส ทั้งนี้โครงสร้างดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างธาตุกับอากาศขณะทำการพ่นเคลือบได้ และเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กมาก จึงมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอนุภาคคาร์บอนได้มาก ทำให้เกิดอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) จากการพ่นเคลือบได้มากตามไปด้วย สุดท้ายจะได้ผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่มีขนาดเล็ก และมีเนื้อหลักที่มีเกรนขนาดเล็กมาก ดังรูป ที่ 17



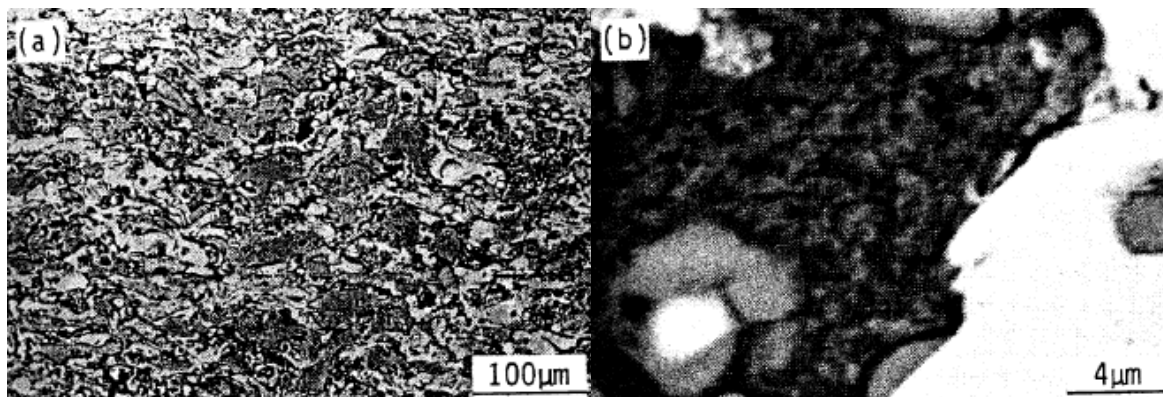
**รูปที่ 17** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่กระจายอยู่ภายในเนื้อพื้นโลหะที่มีเกรนขนาดละเอียด (Wang et al. 2009)

ต่อไปจะกล่าวถึงส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยเทคนิค SHS ซึ่งปรากฏผลงานอยู่ไม่มากนักดังผลการวิจัยของ Li และคณะ และ Liu และคณะ โดยผลงานวิจัยของ Li และคณะเป็นการศึกษาการสังเคราะห์และการพอกของผิวเคลือบวัสดุผสม TiC - Fe ดังรูป ที่ 18



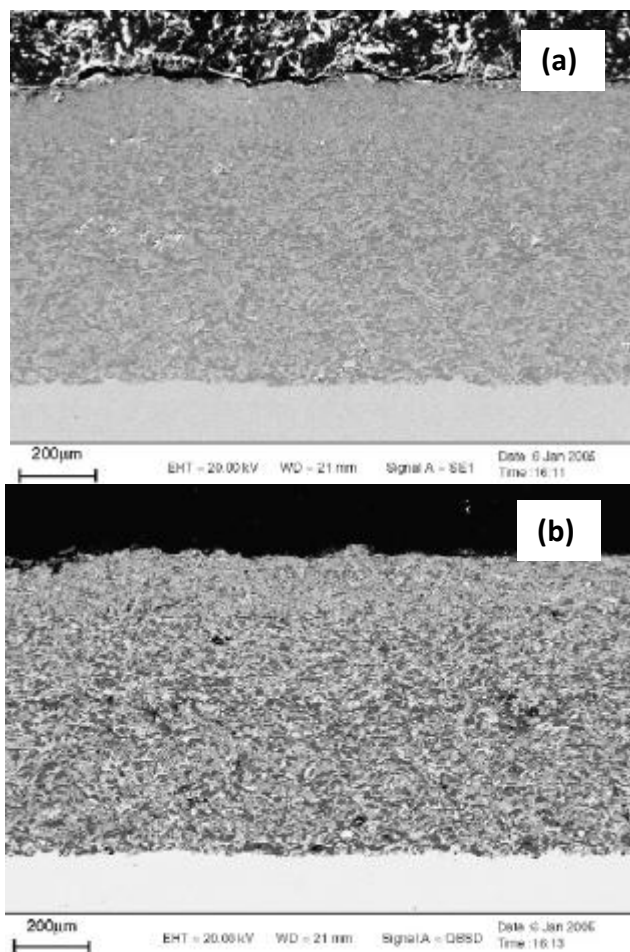
รูปที่ 18 แผนภาพแสดงลักษณะของระบบการพ่นเคลือบในงานวิจัยของ Li และคณะ (Li et al. 2003)

ระบบการพ่นเคลือบเป็นการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่ใช้ระบบแก๊สออกซิอะเซทิลีน สารตั้งต้นที่ใช้ได้แก่ ผงเฟอร์โรไทเทเนียม ผงเหล็ก และผงแกรไฟต์ เพื่อเตรียมผงผสมตั้งต้น โดยเริ่มจากการบดผสมผงเฟอร์โรไทเทเนียมและผงเหล็กให้เข้ากันในแอลกอฮอล์ จากนั้นจึงเติมผงแกรไฟต์ และตัวประสาน แล้วคัดขนาดผงผสมตั้งต้นให้อยู่ในช่วง - 150 + 200 เมช และ - 200 + 300 เมช นำผงผสมตั้งต้นพ่นเคลือบลงบนผิวชิ้นงานเหล็กกล้า โดยจากผลการวิจัยพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยสองเฟสหลัก คือ ไทเทเนียมคาร์ไบด์และเหล็ก และมีไทเทเนียมไดออกไซด์ปรากฏอยู่บ้าง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากออกซิเจนบางส่วนในระบบทำปฏิกิริยากับไทเทเนียม และจากภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะคล้ายกับผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความแบบพลาสมาที่อาศัยเทคนิค SHS และในส่วนที่มีสีทึบมีค่าความแข็งประมาณ 11.9 - 13.7 GPa เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีอนุภาคขนาดเล็กมากและรายรอบด้วยอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักที่เป็นเหล็ก (ดังรูปที่ 19(b)) (Li et al. 2003)



รูปที่ 19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่ความกำลังต่ำของผิวเคลือบ (a) และที่ความเข้มสูงชั้น TiC-rich (b) (Li et al. 2003)

งานวิจัยของ Liu และคณะ ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม TiC - Fe ที่ใช้ยางมะตอย (asphalt) เป็นสารตั้งต้นที่ให้คาร์บอนแก่ระบบ ในการศึกษาจะใช้ยางมะตอยและผงเฟอร์โรไทเทเนียม (ขนาด 6  $\mu\text{m}$ ) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ผิวเคลือบที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมคาร์ไบด์ 53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเนื้อพื้นโลหะ โดยผสมผงเฟอร์โรไทเทเนียม (76.3 wt.%) ให้เข้ากับยางมะตอย (23.7 wt.%) ที่อุณหภูมิ 300  $^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปสังเคราะห์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 600  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนตัว แล้วจึงนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปบดเพื่อให้ได้ผงที่มีขนาดประมาณ 48 - 104  $\mu\text{m}$  และนำผสมตั้งต้นพื้นเคลือบลงบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง จากผลการทดลองพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ เหล็กและไดไทเทเนียมไตร - ออกไซด์ ( $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ) และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายตัดขวางของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบประกอบด้วยสองชั้นที่แตกต่างกัน โดยชั้นที่บางกว่าจะเป็นชั้นของผิวเคลือบ จึงทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดีและมีความพรุนน้อยมากดังรูป ที่ 20



**รูปที่ 20** ภาพถ่ายภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของผิวเคลือบวัสดุผสม TiC - Fe : ด้วยเทคนิคแบล็กสก็ทเทออร์ (BSE) (a) และด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนลำดับที่สอง (SE) (b) (Liu et al. 2007)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนเป็นกระบวนการที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตผิวเคลือบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ผิวเคลือบที่มีความแข็งแรง ความแข็ง และความทนทานต่อการสึกหรอได้ จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น พบว่า กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนประเภทใช้เปลวไฟเป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่มีความซับซ้อนน้อย ให้ประสิทธิภาพของผิวเคลือบที่ดี และมีต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการพ่นเคลือบประเภทอื่นๆ จึงถือเป็นกระบวนการพ่นเคลือบที่น่าสนใจ สำหรับการนำมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ภาคอุตสาหกรรม

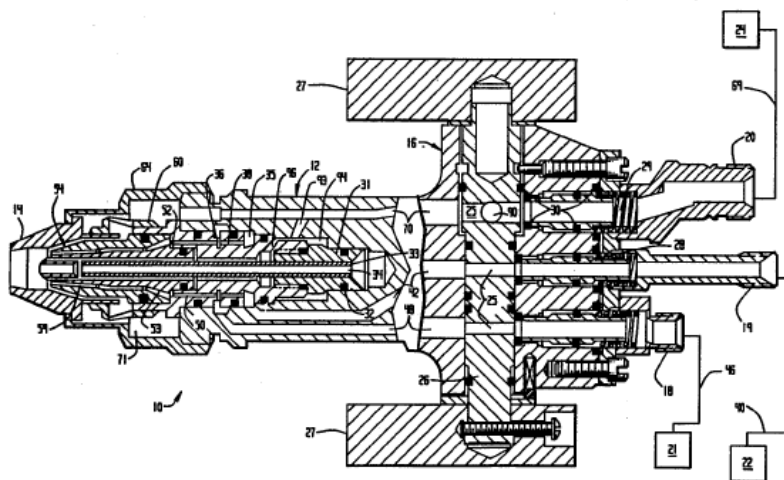
และจากการทบทวนวรรณกรรมในส่วนของการพัฒนากระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนพบว่า กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนที่นำมาประยุกต์นั้น ได้แก่ กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความ

ประเภทที่อาศัยพลาสมา (Zhang et al. 2003; Tekmen et al. 2008; Kumar et al. 2006) เป็นกระบวนการที่นำมาพัฒนา ก่อน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพการเคลือบสูงสุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น แต่กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก ในภายหลังจึงมีการพัฒนากระบวนการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟแทน (Li et al. 2003; Liu et al. 2007) เนื่องด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อย และต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า การพัฒนานั้นสามารถทำได้โดยการนำกระบวนการนี้มาใช้ร่วมกับเทคนิค SHS เพื่อให้กระบวนการนี้มีความสามารถในการพ่นเคลือบวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวได้มากขึ้น เพราะปัจจุบันนี้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง มักจะเป็นวัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อพื้นและเสริมแรงด้วยวัสดุเซรามิก จากกระบวนการพ่นเคลือบประเภทที่ใช้เปลวไฟแบบดั้งเดิมไม่มีความสามารถเพียงพอสำหรับการผลิตผิวเคลือบที่เป็นวัสดุจำพวกเซรามิกได้ (ความร้อนที่ได้จากระบบมีอุณหภูมิต่ำ) งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อพัฒนากระบวนการพ่นเคลือบนี้ให้มีความสามารถในการผลิตผิวเคลือบที่มีประสิทธิภาพสูง และเหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันได้ โดยระบบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ระบบ SHS ของสารตั้งต้น  $Fe_2O_3 - Al$

### สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

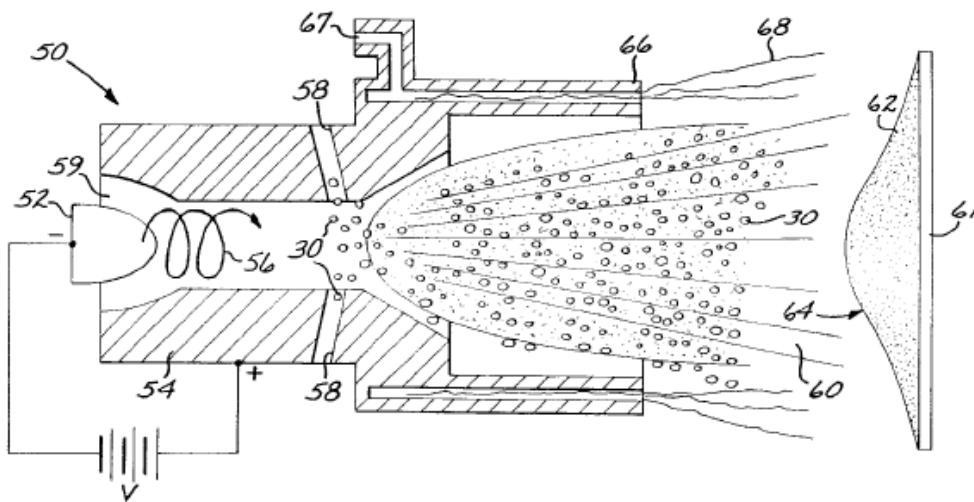
ในปี ค.ศ. 1989 Rotolico และคณะได้จดสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับวิธีการและปืนที่ใช้สำหรับกระบวนการพ่นเคลือบผงด้วยความร้อนและความเร็วสูง โดยจดสิทธิบัตรครอบคลุมในส่วนของวิธีการและเครื่องมือที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตผิวเคลือบที่แน่นและเหนียวด้วยปืนที่ใช้ในการพ่นเคลือบด้วยความร้อน รวมไปถึงจำนวนของหัวพ่น (nozzle) และอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส (gas cap) ซึ่งถูกต่อเพิ่มมาจากหัวพ่น โดยมีผิวภายในเป็นผนังทรงกระบอก ซึ่งใช้เป็นห้องสำหรับการเผาไหม้ โดยจุดที่ทำการเปิดและปิดหัวพ่นจะมีวงแหวนที่ใช้สำหรับให้ส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้ไหลผ่าน เมื่อถูกฉีดด้วยความดันที่น้อยกว่า 2 bar เหนือความดันบรรยากาศของหัวพ่นภายในห้องเผาไหม้ วงแหวนที่ใช้ในการทำให้ความดันอากาศไหลผ่านออกสู่ภายนอกนั้น จะมีการไหลผ่านเมื่อถูกฉีดออกมาจากหัวพ่นที่ติดอยู่กับผนังทรงกระบอก ความร้อนที่สามารถทำให้ผงวัสดุละลายได้จะถูกเพิ่มให้กับระบบผ่านทางแก๊สนำส่งที่ถูกป้อนเข้าทางหัวพ่นภายในห้องเผาไหม้ วงแหวนที่ใช้ในการทำให้ความดันอากาศไหลผ่านเข้าสู่ภายในนั้น จะมีการไหลผ่านเมื่อถูกฉีดจากหัวพ่นเข้าสู่ภายในห้องเผาไหม้ที่อยู่ร่วมกันระหว่างส่วนผสมที่เกิดการเผาไหม้ และแก๊สนำส่ง ในการเผาไหม้ที่วงแหวนผสมลำพลาสมาพุ่งออกมาด้วยความเร็วเหนือเสียงและมาพร้อมกับผง ถูกขับเคลื่อนผ่านจุดเปิด-ปิดเพื่อผลิตผิวเคลือบ อุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊ส (gas cap) ส่วนที่สองที่มีจุดเปิดขนาดแตกต่างกันอาจถูกใช้ในการปรับขนาดของลำพลาสมาได้ (Rotolico et al. 1989) ในปีต่อมาได้จดสิทธิบัตรอีกครั้งในส่วนของปืนที่ใช้ในการพ่นเคลือบผงและลวดด้วยความร้อน โดยอาศัยวิธีการเดียวกันนี้แต่มีการเพิ่มความสามารถ

ของปิ่น เพื่อให้ปิ่นนั้นมีความสามารถในการใส่ลวดสำหรับการพันเคลือบได้ด้วย (Rotolico et al. 1990) ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แผนภาพแสดงลักษณะของปิ่นพันในระบบพันเคลือบของ Rotolico และคณะ

และในปีค.ศ. 2002 Upadhy และคณะได้ขอจดสิทธิบัตรในส่วนของการพันเคลือบด้วยความร้อนสำหรับการผลิตผิวเคลือบวัสดุผสมที่มีโลหะเป็นเนื้อพื้นและมีส่วนเสริมแรงเป็นอนุภาค โดยผงวัสดุผสมก่อนการผลิตผิวเคลือบจะถูกเตรียมขึ้นเป็นครั้งแรก และมีการปรับปรุงเพื่อให้ใช้ได้กับความดันที่ไม่น้อยกว่า 0.75 บรรยากาศ เพื่อป้องกันการออกซิเดชันจากอากาศ ผงวัสดุผสมก่อนการผลิตผิวเคลือบมีปริมาณมากและแต่ละผงจะถูกก่อรูปเป็นเนื้อพื้นและมีส่วนเสริมแรงกระจายตัวอยู่ภายใน โดยเนื้อพื้นที่มีส่วนประกอบเป็นโลหะ ได้แก่ โมลิบดีนัม (Mo) แฮฟเนียม (Hf) เซอร์โคเนียม (Zr) ไทเทเนียม (Ti) วานเดียม (V) ไนโอเบียม (Nb) แทนทาลัม (Ta) หรือสังกะสี (Zn) และเนื้อพื้นที่มีส่วนประกอบเป็นอโลหะ ได้แก่ ซิลิกอน (Si) โบรอน (B) หรือคาร์บอน (C) อนุภาคที่เป็นส่วนเสริมแรง ได้แก่ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โบรอนคาร์ไบด์ (BC) ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) หรือโบรอนไนไตรด์ (BN) ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 แผนภาพแสดงลักษณะของปืนพ่น สำหรับใช้ในระบบการพ่นเคลือบของ Upadhy และคณะ  
(Upadhy et al. 2002)

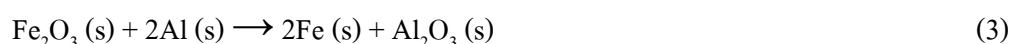
จากการค้นคว้าสิทธิบัตรในข้างต้นพบว่า ผู้ขอจดสิทธิบัตรสำหรับกระบวนการและปืนพ่นที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบต่างๆ ทั้งแบบที่ใช้ผงและลวดเป็นวัตถุดิบตั้งต้น อย่างไรก็ตามยังมีข้อแตกต่างกับงานวิจัยที่จะนำเสนอ ทำให้พอที่จะสรุปในเบื้องต้นได้ว่า งานวิจัยนี้มีศักยภาพในการยื่นขอจดสิทธิบัตรได้ ทั้งนี้เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลายแก่โรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในส่วนของงานซ่อมบำรุง และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้แก่เครื่องจักรกล

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม  $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$  ได้ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบเปลวไฟที่อาศัยเทคนิคปฏิกิริยาถ่วงน้ำหนักด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบ ตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พิสูจน์ทราบเฟสที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) และทดสอบสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบที่ได้

## ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนวัสดุฐานเหล็กกล้า การดำเนินการวิจัยครั้งนี้จึงยึดเอาปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 เป็นปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการวิจัย เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงได้ง่าย เพราะมีอุณหภูมิเอนเดอติกของระบบสูงมาก และเฟสเหล็กอิสระ (Fe) ซึ่งเป็นเฟสผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้เป็นตัวประสานที่ดีระหว่างผิวเคลือบวัสดุผสมกับผิวชิ้นงานตัวอย่าง



โดยการศึกษาวิจัยจะมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

### ก) การศึกษากระบวนการพ่นเคลือบเบื้องต้น

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนวัสดุฐานเหล็กกล้าด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง

#### กิจกรรมที่ ก1 : การเตรียมส่วนผสมตั้งต้น

จากศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเตรียมส่วนผสมตั้งต้นประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ การเตรียมผงของส่วนผสมตั้งต้น และการคัดขนาดของส่วนผสมตั้งต้นดังกล่าว

การเตรียมส่วนผสมตั้งต้น มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งผงสารตั้งต้นตามสัดส่วนในสมการที่ 3
2. บดผสมผงสารตั้งต้นให้เข้ากันด้วยเครื่องบดบอลมิลล์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เติมสารละลายที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสัดส่วน 1 ต่อ 1 กับปริมาณของผงผสมตั้งต้น และบดผสมต่ออีก 24 ชั่วโมง
4. นำส่วนผสมที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 °C
5. บดส่วนผสมที่ได้อีกครั้งด้วยโกร่งบดยา เพื่อให้ส่วนผสมตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ มีขนาดเล็กลงและสามารถนำไปใช้งานได้

การคัดขนาดของเม็ดส่วนผสมตั้งต้น จะคัดออกเป็น 5 ช่วงดังนี้

1. ขนาดใหญ่กว่า 105  $\mu\text{m}$

2. ขนาด 75 - 105  $\mu\text{m}$
3. ขนาด 53 - 75  $\mu\text{m}$
4. ขนาด 45 - 53  $\mu\text{m}$
5. ขนาดเล็กกว่า 45  $\mu\text{m}$

### กิจกรรมที่ ก2 : การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

1. ตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 3 mm ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด  $4 \times 10 \text{ cm}^2$
2. ขัดผิวของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 80 เพื่อเพิ่มความหยาบให้แก่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง
3. สันทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

### กิจกรรมที่ ก3 : การพ่นเคลือบเบื้องต้น

ทำการทดลองพ่นเคลือบเบื้องต้น โดยการนำผงผสมตั้งต้นที่เตรียมขึ้นใส่ในขวดพลาสติกที่มีการต่อเชื่อมกับวาล์วของปั๊มลม เพื่อใช้ในการป้อนผงผสมตั้งต้นเข้าสู่เปลวไฟของหัวพ่นไฟออกซิ - อะเซทิลีน (หัวพ่นไฟที่ใช้ในการตัดเหล็ก) ก่อนเปลวไฟจะจุดระเบิดผงผสมตั้งต้น และปล่อยให้มีการทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ก่อนจะตกลงบนผิวของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง

### ข) การศึกษากระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

#### กิจกรรมที่ ข1 : กระบวนการเคลือบด้วยความร้อนเบื้องต้น

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง และระบุตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมในเบื้องต้น โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ชั่งผงสารตั้งต้นตามสัดส่วนในสมการที่ 3
2. บดผสมผงสารตั้งต้นให้เข้ากันด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เติมน้ำละลายที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสัดส่วน 1 ต่อ 1 กับปริมาณของผงผสมตั้งต้น และบดผสมต่ออีก 24 ชั่วโมง จะได้ส่วนผสมตั้งต้นตามต้องการ
4. เตรียมแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง โดยการตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 3 mm เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ  $4 \times 10 \text{ cm}^2$  พร้อมกับการขัดผิวของแผ่นเหล็กกล้า

ตัวอย่างด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 80 และการสันทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก

5. นำส่วนผสมตั้งต้นที่เตรียมขึ้นทาลงบนผิวของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างให้มีความหนาประมาณ 48  $\mu\text{m}$  (หนาเท่ากับความหนาของเทปใส 1 ชั้น)
6. อบแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เพื่อให้ผิวเคลือบตั้งต้นแห้ง
7. จูกระเบิดผิวเคลือบตัวอย่างด้วยเปลวไฟออกซิ - อะเซทิลีน

## กิจกรรมที่ ข2 : ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการเคลือบผิว

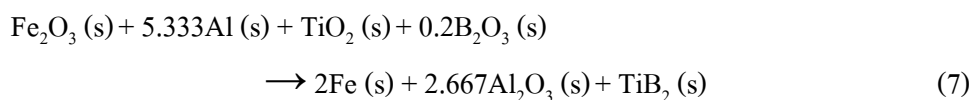
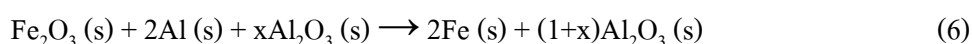
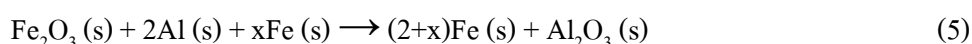
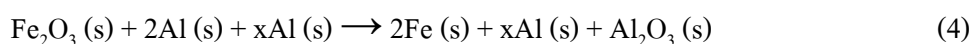
การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อการเคลือบผิว จะมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. ชั่งผงสารตั้งต้นตามสัดส่วนในปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ศึกษา
2. บดผสมผงสารตั้งต้นให้เข้ากันด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เติมน้ำมันที่มียุโรปอลิโวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสัดส่วน 1 ต่อ 1 กับปริมาณของผงผสมตั้งต้น และบดผสมต่ออีก 24 ชั่วโมง จะได้ส่วนผสมตั้งต้นตามต้องการ
4. เตรียมแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง โดยการตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนาตามที่กำหนดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ  $2 \times 5 \text{ cm}^2$  พร้อมกับการขัดผิวของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 80 และการสันทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก
5. นำส่วนผสมตั้งต้นที่เตรียมขึ้นทาลงบนผิวของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างให้มีความหนา 1 mm
6. อบแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เพื่อให้ผิวเคลือบตั้งต้นแห้ง
7. จูกระเบิดผิวเคลือบตัวอย่างด้วยเปลวไฟออกซิ - อะเซทิลีน

ตัวแปรที่สนใจนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง ความหนาของผิวเคลือบตั้งต้น ตัวประสาน การเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง การให้ความร้อนก่อนการจูกระเบิดผิวเคลือบตั้งต้น สารตัวเติมที่ใช้ในส่วนผสมตั้งต้น และลักษณะของส่วนผสมตั้งต้น โดยตัวแปรแต่ละตัวจะมีเงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกันดังนี้

- ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง : 1.2 2 และ 3 mm
- ความหนาของผิวเคลือบตั้งต้น : 1 และ 2 mm

- ตัวประสาน ในการศึกษาผลกระทบของตัวประสาน จะศึกษาผลกระทบของตัวแปรนี้ จากตัวแปรย่อยๆ ทั้งสามเหล่านี้คือ ชนิดของตัวประสาน สัดส่วนของตัวประสานใน สารละลายตัวประสาน และตัวทำละลายที่ใช้ในสารละลายตัวประสาน ซึ่งตัวแปรย่อย ทั้งสามจะมีเงื่อนไขในการทดลองดังต่อไปนี้
  1. ชนิดตัวประสาน : พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเมทิลเซลลูโลส
  2. สัดส่วนของตัวประสานในสารละลายตัวประสาน : ร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ของสารละลายตัวประสาน
  3. ตัวทำละลายที่ใช้ในสารละลายตัวประสาน : น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์
- การเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง : มี และไม่มีการพ่นทรายบนผิวแผ่นเหล็กกล้า ตัวอย่างก่อนนำตัวอย่างไปใช้ในการเคลือบผิว
- การให้ความร้อนก่อนการจุ่มระเบิดผิวเคลือบตั้งต้น : มี และไม่มีการให้ความร้อน เบื้องต้นก่อนทำการจุ่มระเบิดผิวเคลือบตั้งต้น โดยความร้อนเบื้องต้นที่ให้แก่ชิ้นงาน ตัวอย่างอยู่ที่อุณหภูมิ 400 °C
- สารตัวเติมที่ใช้ในส่วนผสมตั้งต้น : ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อะลูมิเนียม อะลูมินา เหล็ก ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ โบรอนออกไซด์ โดยสารตัวเติมแต่ละตัวจะ เติบโตตามสัดส่วนในปฏิกิริยาเคมีของสมการต่อไปนี้

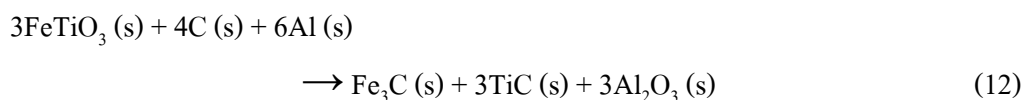
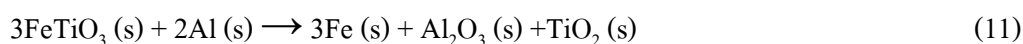
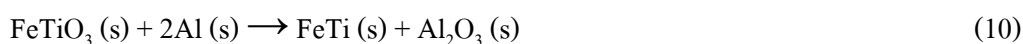
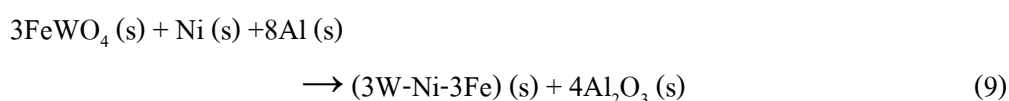
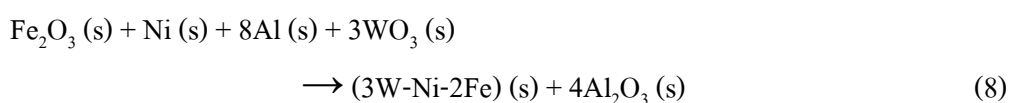


- เงื่อนไขของลักษณะของส่วนผสมตั้งต้น : ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์และชนิดผง

### ค) การศึกษากระบวนการพ่นเคลือบ

#### กิจกรรมที่ ค1 : การศึกษาผลกระทบของระบบสารตั้งต้น

จากการศึกษากระบวนการเคลือบด้วยความร้อนข้างต้น พบว่า ระบบสารตั้งต้นมีผลเป็นอย่างมากต่อการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนวัสดุฐานเหล็กกล้า เนื่องจากระบบสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบนั้นนอกจากจะต้องมีการไหลตัวที่ดีแล้ว จะต้องมียุณหภูมิแอ - เดียเบติกที่สูงกว่า 1800 °C เพื่อให้ปฏิกิริยาของระบบสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยเราจะทำการศึกษาทั้งพฤติกรรมของการไหลและการเกิดปฏิกิริยาของผงผสมตั้งต้นจากระบบสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 และปฏิกิริยาเคมีในสมการอื่นๆ ดังต่อไปนี้



และมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ชั่งผงสารตั้งต้นตามสัดส่วนในสมการเคมีที่กำหนด
2. บดผสมผงสารตั้งต้นให้เข้ากันด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เตรียมแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง โดยการตัดแผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 1.2 mm เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดเท่ากับ  $2 \times 5 \text{ cm}^2$  พร้อมกับการเตรียมผิวตามเงื่อนไขที่ 2 ในกิจกรรมที่ 5
4. นำผงผสมตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่ในกระเปาะของหัวพ่นเคลือบ
5. ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C
6. จุกระเบิดผงผสมตั้งต้นด้วยเปลวไฟออกซิ - อะเซทิลีน พร้อมไปกับการพ่นเคลือบลงบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมไว้

## กิจกรรมที่ ค2 : การศึกษาผลกระทบของระยะการพ่นเคลือบ

ระยะห่างระหว่างผิวของชิ้นงานตัวอย่างและเปลวไฟถือเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ จึงได้ทำการทดลองโดยการนำผงผสมตั้งต้นที่เป็นระบบสารตั้งต้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ และใช้ได้ดีกับหัวพ่นเคลือบ มาใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบเพื่อศึกษาผลกระทบของระยะการพ่นเคลือบต่อผิวเคลือบวัสดุผสม ซึ่งจะพิจารณาระยะห่างที่ 5 10 และ 15 cm ตามลำดับ

### กิจกรรมที่ ๓3 : การศึกษาผลกระทบของขนาดของผงผสมตั้งต้น

จากการทดลองพ่นเคลือบเบื้องต้นพบว่า ขนาดของผงผสมตั้งต้นมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อการก่อรูปของผิวเคลือบวัสดุผสม จึงทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนขนาดของผงผสมตั้งต้นเป็นสองช่วงขนาด ดังนี้

1. ขนาด 75 - 105  $\mu\text{m}$
2. ขนาดเล็กกว่า 45  $\mu\text{m}$

#### ง) การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบวัสดุผสม

มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

1. เตรียมตัวอย่างโดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างในแนวขวาง เพื่อให้เห็นภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง หล่อเรซินและขัดผิวหน้าด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ โดยขัดเรียงลำดับจากเบอร์หยาบไปยังเบอร์ละเอียดตามลำดับด้วยจานหมุน
2. นำตัวอย่างที่ได้ขัดผิวละเอียดด้วยผงขัดอะลูมินาขนาด 5 และ 1  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ บนจานหมุนแบบผ้าสักหลาด
3. ทำความสะอาดด้วยน้ำ และล้างทำความสะอาดในน้ำกลั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก
4. นำไปทดสอบความแข็ง โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

น้ำหนักกด = 4.905 นิวตัน

เวลากดแช่ = 10 วินาที

กำลังขยายในการวัดรอยกด = 100 เท่า

จำนวนจุดกด = 10 จุด

ชนิดหัวกด = หัวกดเพชรรูปทรงสี่เหลี่ยมปิรามิดที่มีมุมปลายแหลม 136 องศา

5. การหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) คำนวณตามสมการที่ 13

$$HV = \frac{0.1891F}{d^2} MPa \quad (13)$$

เมื่อ  $d$  = เส้นทแยงมุมของรอยกด =  $\frac{(d_1 + d_2)}{2}$  (mm)

$F$  = แรงที่ใช้กด (N)

จ) การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 23 เครื่องมือในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. นำเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอติดตั้งบนเครื่องชั่งตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.6
2. ชั่งน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างทุกครั้งทั้งก่อนและหลังทำการทดสอบ
3. นำไปทดสอบความต้านทานการสึกหรอ โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

ความเร็วงานหมุน = 200 รอบต่อนาที

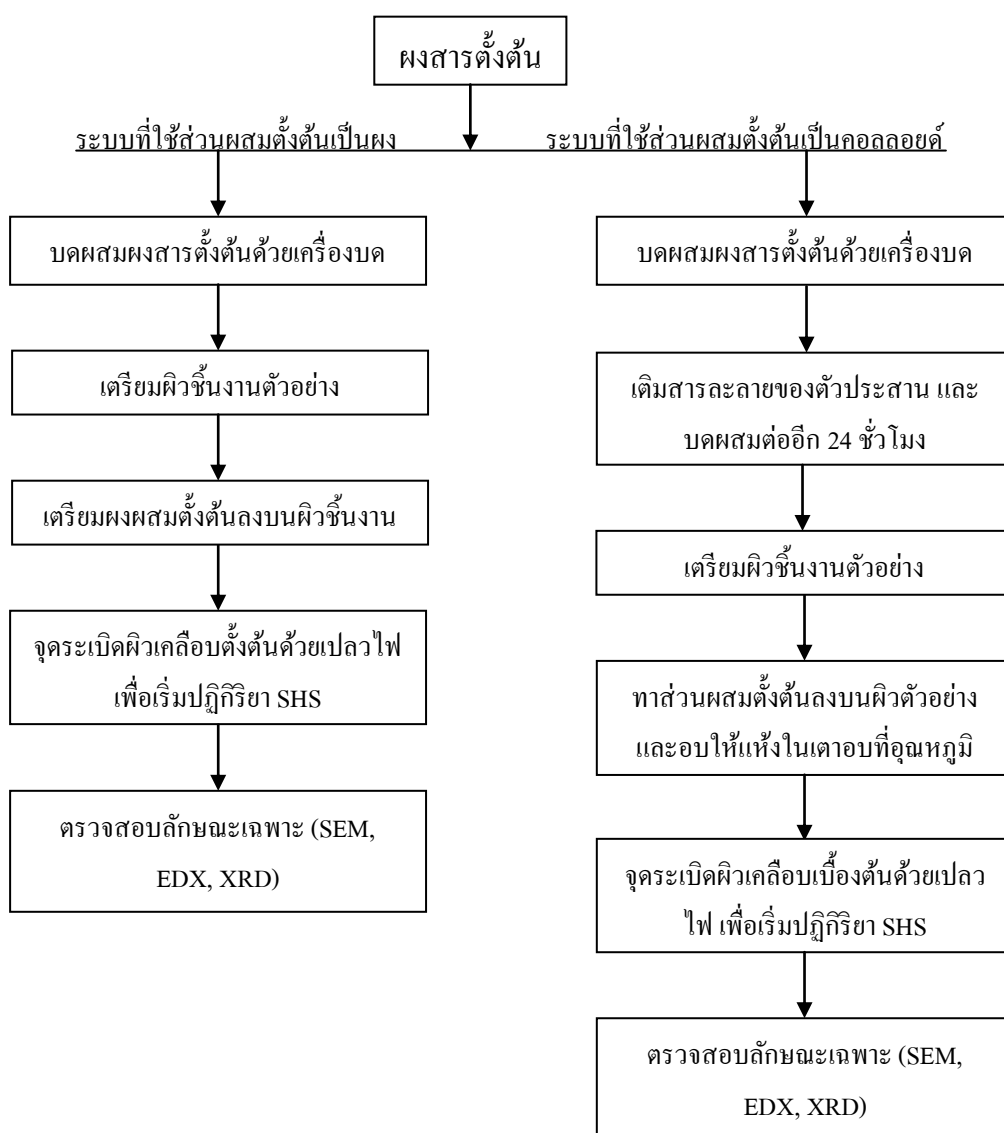
กระดาศษัฒ์ชิลิกอนคาร์ไบด์ = เบอร์ 320

เวลาในการทดสอบ = 0 15 30 45 และ 60 นาที

## ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยโดยสรุป

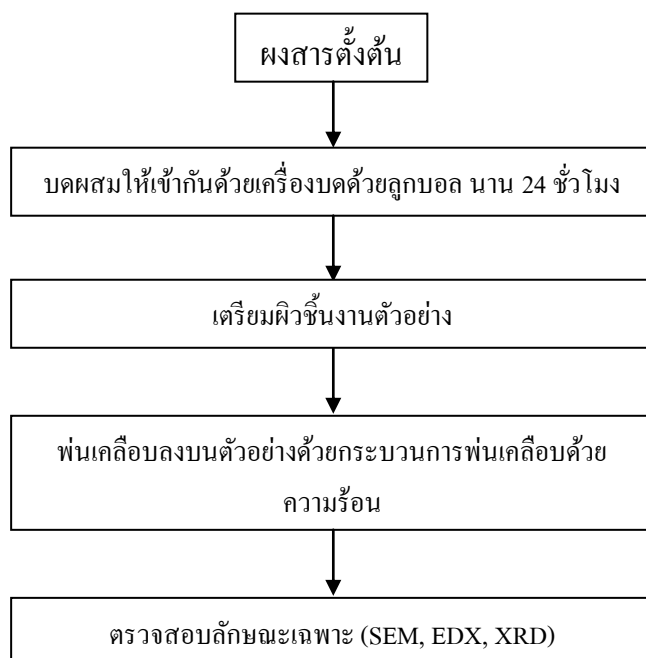
วิธีการทดลองและขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 24 ถึง 26 ดังนี้

**การทดลองที่ 1** ระบบการเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 24 ขั้นตอนการเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง

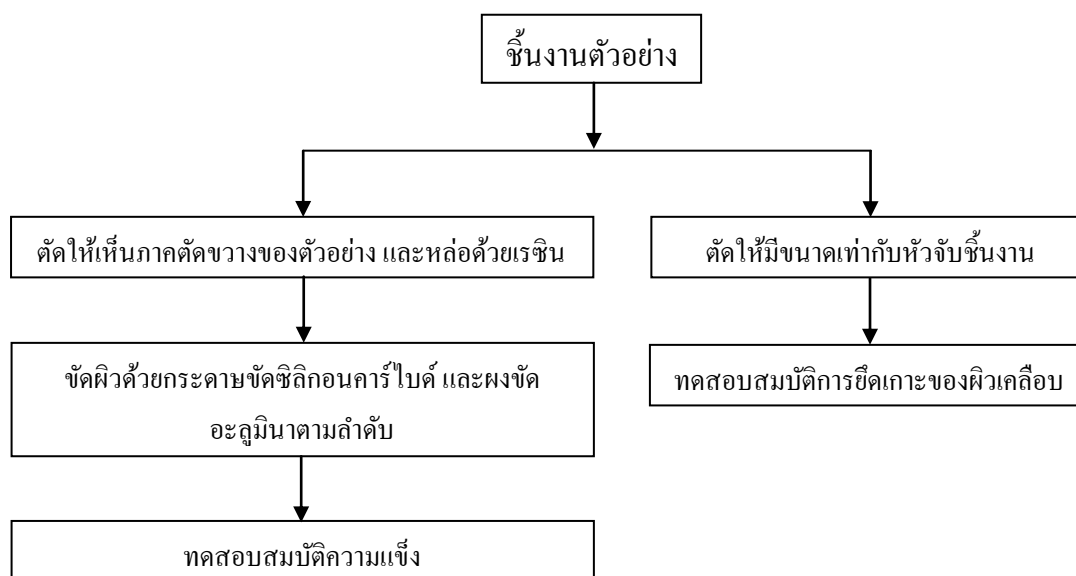
**การทดลองที่ 2** ระบบการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง



**รูปที่ 25** ขั้นตอนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิ

สูง

### การทดลองที่ 3 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม



รูปที่ 26 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติของผิวเคลือบวัสดุผสม

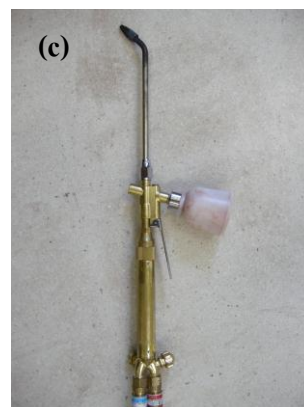
### วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ วิเคราะห์และทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 รูปที่ 27 และ 28

ตารางที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	ยี่ห้อ	แบบ/รุ่น
Electronic Balance	Pioneer	P4214
Beaker	Pyrex	250 ml
Cylinder	Pyrex	100 ml
Magnetic Bar	-	-
Hotplate-stirrer	LMS	HTS-1003
Two Roll Ball Mill Machine	Constructed by Dr.Wiriya Thongruang	-
Oven	Memmert	UNE 400
Steel Plate	-	Thickness 1.2, 2 and 3

Silicon Carbide Grinding Paper	BUEHLER	mm p80, p180, p320, p600, p800, p1200 and p2500
Sand Blasting Set	Constructed by CMERG	-
Powder Spraying Torch	Harris	H87
Oxy-acetylene Gas Set	Constructed by Thaisafe Ltd.	-
Optical Microscope	Olympus	BH2-UMA
Wear Tester	Constructed by CMERG	
Sieve	Retsch	#140, #200 and #325
Sieve Shaker	Octagon Digital	-
Ultrasonic Cleaner	Crest Ultrasonics	CP 200 HT



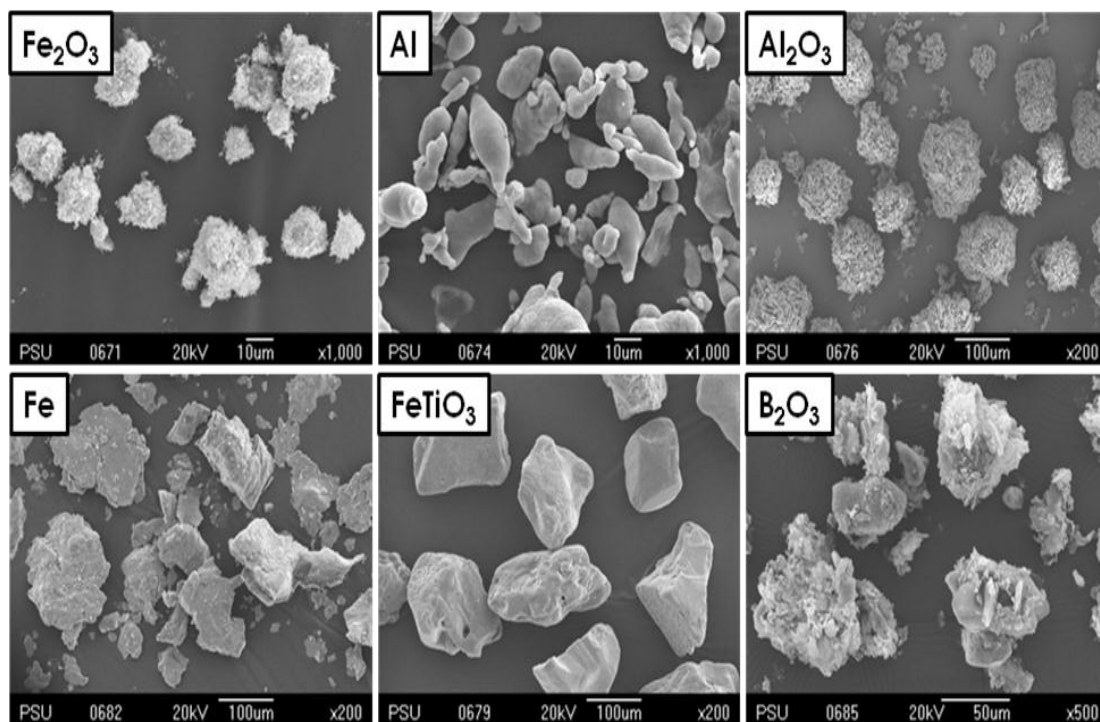
รูปที่ 27 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ (a) Fume Hood (b) Oxy-acetylene Gas Set และ (c) Powder Spraying Torch

### สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการทดลอง

ชื่อทางการค้า	ขนาด อนุภาค	ความบริสุทธิ์ (%)	ผู้ผลิต
Aluminum powder (Al)	45	93	Himedia Laboratories
Iron (III) oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		97	Riedel-de Haën
Aluminum dioxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		98	Riedel-de Haën
Titanium dioxide (TiO <sub>2</sub> )	36.71	99	Asia pacific Specialty Chemicals Limited
Boron oxide (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1017	99	Sigma-Aldrich Chemical Company
Iron powder (Fe)		99	-
Polyvinyl alcohol		-	Ajex Finechem
Methylcellulose			Sigma-Aldrich Chemical Company
Zinc stearate		10 - 12 %Zn basis	Sigma-Aldrich Chemical Company
Calcium fluoride (CaF <sub>2</sub> )		98	Carlo Erba Reagents Company
Distilled water	-	-	Constructed by Department of Mining and Materials Engineering



รูปที่ 28 โครงสร้างจุลภาคของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

## ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลการคำนวณและวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาการก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงของสารตั้งต้นในระบบต่างๆ ส่วนที่สองเป็นผลการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม โดยวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ วิเคราะห์องค์ประกอบของผิวเคลือบวัสดุผสมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) และวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ และส่วนสุดท้ายเป็นผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบวัสดุผสม โดยศึกษาค่าความแข็ง (การทดสอบความแข็งของผิวเคลือบวัสดุผสม) และความแข็งแรงในการยึดเกาะ (การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ) ของผิวเคลือบวัสดุผสม

### ผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์

ในการวิเคราะห์อาศัยหลักการพลังงานกิบส์ต่ำที่สุด (gibbs energy minimization) ในการคำนวณความเข้มข้นสมดุล (equilibrium concentration) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการของปฏิกิริยาการก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง (Gokcen et al. 1996)

พัฒนาการของการก่อรูปของสาร จำนวนจากการลดลงของบรรยากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันในช่วงอุณหภูมিরะหว่าง 0 ถึง 3000 °C และในการคำนวณสมมติให้เป็นสภาวะแก๊สอุดมคติ (ideal gas) และการผสมของแก๊สอุดมคติ และเฟสควบแน่น (condense phase) เป็นเฟสบริสุทธิ์ พลังงานกิบส์รวมของระบบสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 14

$$G = \sum_{gas} n_i (g_i^\circ + RT \ln P_i) + \sum_{condensed} n_i g_i^\circ + \sum_{solution} n_i (g_i^\circ + RT \ln x_i + RT \ln \gamma_i) \quad (14)$$

เมื่อ  $G$  คือ พลังงานกิบส์รวมของระบบ,  $g_i^\circ$  คือ โมลาร์มาตรฐานของพลังงานกิบส์ของสาร  $i$  ที่ค่าความดันและอุณหภูมิ,  $n_i$  คือ จำนวนโมลของสาร  $i$ ,  $x_i$  คือ สัดส่วนโมลของสาร  $i$  และ  $\gamma_i$  คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตี้ของสาร  $i$

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้ปฏิกิริยาในสมการที่ 3 เป็นปฏิกิริยาหลักของระบบการสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสมบนวัสดุฐานเหล็กกล้า ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางอุณหพลศาสตร์ ของการสังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

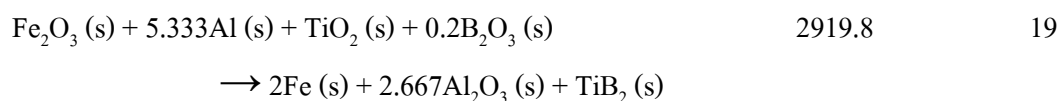
จากสมการปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นสามารถคำนวณหาอุณหภูมิแอเดียแบติกได้ด้วยโปรแกรม HSC Chemistry<sup>®</sup> ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3527.6 °C (outokumpu HSC chemistry<sup>®</sup> for windows, HSC 5.11) และจากหลักการที่เป็นที่ยอมรับ(สุธรรม 2552) ที่กล่าวว่า ปฏิกิริยาของระบบการสังเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยาก้าวหน้าขึ้นได้ด้วยตัวเอง เมื่อเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่มีอุณหภูมิแอเดียแบติกสูงกว่า 1800 °C ซึ่งจากการคำนวณนั้นพบว่า ระบบการสังเคราะห์นี้มีอุณหภูมิแอเดียแบติกสูงกว่า 1800 °C จึงถือว่าระบบการสังเคราะห์นี้มีความเป็นไปได้ของการปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง

นอกจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 แล้ว ได้นำปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ที่จะส่งผลที่ดีต่อการก่อรูปของผิวเคลือบบนวัสดุฐานเหล็กกล้ามาพิจารณาความเป็นไปได้ทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### กระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

เมื่อนำสารตั้งต้นในสมการที่ 3 ไปใช้ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบบนวัสดุฐานเหล็กกล้าพบว่า ผิวเคลือบที่ได้นั้นมีความขรุขระ และยึดเกาะได้ไม่ดีบนวัสดุฐานเหล็กกล้า เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นในสมการที่ 3 นั้นมีความรุนแรงมากขณะทำปฏิกิริยา จึงทำให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความขรุขระ และยึดเกาะได้ไม่ดีบนวัสดุฐาน จึงทำการเติมสารตัวเติมบางชนิดลงไป เพื่อให้ผิวเคลือบมีความขรุขระน้อยลง และยึดเกาะวัสดุฐานได้ดีขึ้น โดยสารตัวเติมที่เติมลงไปในระบบสารตั้งต้นนั้นได้แก่ อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) โบรอน - ออกไซด์ (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) อะลูมิเนียม (Al) และเหล็ก (Fe) ซึ่งแต่ละชนิดของสารตัวเติมจะมีความเป็นไปได้ในการก่อรูปของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน และได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ขึ้นด้วยการคำนวณอุณหภูมิแอเดียแบติกของระบบสารตั้งต้นนั้นๆ

ปฏิกิริยาเคมี	อุณหภูมิแอเดียแบติก (T <sub>ad</sub> ), °C	สมการที่
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + 2Al (s) + 1Fe (s) → 3Fe (s) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	3096.2	15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + 2Al (s) + 1Al (s) → 2Fe (s) + Al (s) + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	3207.3	16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + 2Al (s) + 0.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) → 2Fe (s) + 1.2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	2847.9	17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) + 2Al (s) + 0.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s) → 2Fe (s) + 1.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	2678.4	18



จากการคำนวณอุณหภูมิแอเดียแบติกข้างต้นนี้ จะเห็นว่าในทุกๆ ปฏิกิริยานั้นล้วนมีอุณหภูมิแอเดียแบติกสูงกว่า 1800 °C จึงสามารถนำปฏิกิริยาเหล่านี้ไปใช้สังเคราะห์ผิวเคลือบด้วยเทคนิคปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงได้

### กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

ปฏิกิริยาเคมี	อุณหภูมิแอเดียแบติก ( $T_{ad}$ ), °C	สมการที่
$\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{s}) + \text{Ni} (\text{s}) + 8\text{Al} (\text{s}) + 3\text{WO}_3 (\text{s})$ $\rightarrow (3\text{W-Ni-2Fe}) (\text{s}) + 4\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{s})$	3406.8	8
$3\text{FeWO}_4 (\text{s}) + \text{Ni} (\text{s}) + 8\text{Al} (\text{s})$ $\rightarrow (3\text{W-Ni-3Fe}) (\text{s}) + 4\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{s})$	3093.3	9
$\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 2\text{Al} (\text{s}) \rightarrow \text{FeTi} (\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{s})$	2053.0	10
$3\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 2\text{Al} (\text{s}) \rightarrow 3\text{Fe} (\text{s}) + \text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{s})$	2861.3	11
$3\text{FeTiO}_3 (\text{s}) + 4\text{C} (\text{s}) + 6\text{Al} (\text{s})$ $\rightarrow \text{Fe}_3\text{C} (\text{s}) + 3\text{TiC} (\text{s}) + 3\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{s})$	2379.3	12

จากการคำนวณอุณหภูมิแอเดียแบติกของปฏิกิริยาในสมการเคมีที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนพบว่า ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาก้าวหน้าขึ้นได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิแอเดียแบติกมากกว่า 1800 °C

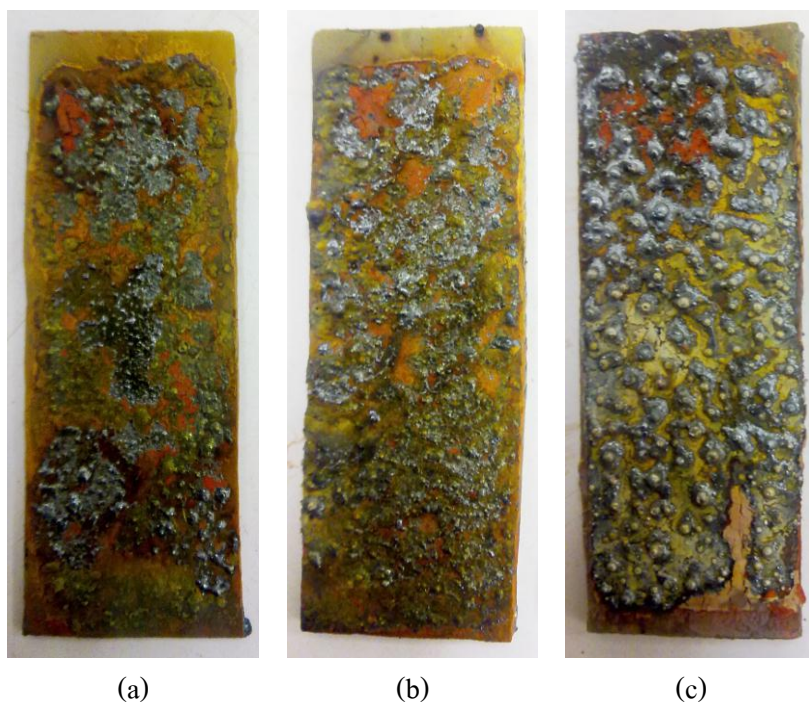
### ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในระบบต่างๆ ด้วยภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพธรรมดา โดยจะพิจารณาถึงความสม่ำเสมอของผิวเคลือบและการยึดเกาะของผิวเคลือบกับวัสดุฐานในเบื้องต้น ซึ่งจะแบ่งพิจารณาในแต่ละเงื่อนไขดังนี้

## กระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

### ผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง

จากการศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ โดยศึกษาเปรียบเทียบกันในระบบที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าที่มีความหนา 1.2 2 และ 3 mm พบว่า เมื่อเลือกใช้แผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างที่มีความหนามากขึ้น ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะมีความขรุขระมากขึ้นและจะยึดเกาะกับผิววัสดุฐาน ได้น้อยลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 29 เนื่องจากความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างส่งผลกระทบต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบการสังเคราะห์ผิวเคลือบ โดยแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างที่มีความหนามากกว่า จะมีพื้นที่ในการดูดกลืนความร้อนได้มากกว่าชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาน้อยกว่า ทำให้มีความร้อนสะสมในระบบไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ของผิวเคลือบตั้งต้นได้ และทำให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้สัมผัสกับผิววัสดุฐานได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิววัสดุฐานมีค่าน้อยลงตามลำดับ (โดยพิจารณาจากการใช้ปรอททองเหลืองขัดผิวชิ้นงานตัวอย่างหลังทำการเคลือบผิวสำเร็จ)



รูปที่ 29 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้แผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างที่มีความหนา a) 1.2 mm b) 2 mm และ c) 3 mm

### ผลกระทบของความหนาของผิวเคลือบตั้งต้น

จากการศึกษาผลกระทบของความหนาของผิวเคลือบตั้งต้นต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่เตรียมผิวเคลือบตั้งต้นหนา 1 และ 2 mm พบว่า ระบบที่เตรียมผิวเคลือบตั้งต้นที่ความหนามากกว่า ปฏิกริยาของผิวเคลือบตั้งต้นจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์มากกว่า แต่มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานได้น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 30 เนื่องจากระบบที่เตรียมผิวเคลือบตั้งต้นที่ความหนามากกว่าเป็นระบบที่มีสารตั้งต้นในปริมาณที่มากกว่า ในการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจึงใช้ความร้อนมากกว่า จึงทำให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้เกาะติดบนผิววัสดุฐานได้น้อย ทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานน้อยลงตามลำดับ



(a)

(b)

รูปที่ 30 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่มีผิวเคลือบตั้งต้นหนา a) 1 mm และ b) 2 mm บนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา 1.2 mm

### ผลกระทบของตัวประสาน

ในการศึกษาผลกระทบของตัวประสานต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ จะศึกษาในรายละเอียดของตัวแปรย่อยๆ 3 ตัวแปรต่อไปนี้

#### ผลกระทบของชนิดของตัวประสาน

จากการศึกษาผลกระทบของชนิดของตัวประสานต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเมทิลเซลลูโลส เป็นตัวประสาน พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้เมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานจะมีผิวที่ขรุขระกว่าและยึดเกาะบนผิววัสดุฐานได้น้อยกว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสานดังแสดงในรูปที่ 31 เพราะเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานที่มีสมบัติในการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จึงทำให้ระบบการสังเคราะห์ที่ใช้เมทิลเซลลูโลสสูญเสียความร้อนไปขณะทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นมากกว่า เพื่อจะนำความร้อนเหล่านั้นมากำจัดความชื้นที่มีอยู่ในผิวเคลือบตั้งต้น จึงทำให้ความร้อนในระบบการสังเคราะห์มีไม่เพียงพอต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิอย่างสมบูรณ์และสม่ำเสมอได้



รูปที่ 31 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้ a) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ b) เมทิลเซลลูโลส เป็นตัวประสาน

#### ผลกระทบของสัดส่วนตัวประสานในสารละลายตัวประสาน

จากการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนตัวประสานต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นประสานในสัดส่วนร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนักใน

สารละลายตัวประสานพบว่า ระบบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วนที่มากกว่าจะมีความขรุขระของผิวเคลือบน้อยกว่า เพราะเมื่อใช้ตัวประสานในสัดส่วนที่มากกว่า จะทำให้สารละลายตัวประสานมีความหนืดสูงกว่า จึงทำให้สารตั้งต้นมีการกระจายตัวในสารละลายที่ดีกว่า ดังนั้นผิวเคลือบตั้งต้นที่ผ่านการทำให้แห้งแล้วจะมีสารตั้งต้นคงเหลืออยู่ในผิวเคลือบมากกว่า ส่งผลให้ปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงดำเนินไปได้ง่ายและสมบูรณ์มากกว่า เนื่องจากตัวประสานเข้าซัดขวางการดำเนินไปของปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงได้น้อยกว่า แต่ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วนที่น้อยกว่าจะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานที่ดีกว่า เนื่องจากมีความร้อนสะสมในระบบการสังเคราะห์มากกว่า ทำให้ผิวเคลือบสามารถยึดเกาะบนผิววัสดุฐานได้ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้สารละลายตัวประสานที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วน a) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ b) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

#### ผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายในสารละลายตัวประสาน

จากการศึกษาผลกระทบของชนิดของตัวทำละลายต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่ใช้น้ำกลั่น และเอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายในสารละลายตัวประสานพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายมีความขรุขระของผิวเคลือบน้อยกว่า และมีความต่อเนื่องของผิวเคลือบมากกว่า แต่ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานดีกว่า เพราะเอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายที่จะช่วยเสริมให้การทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นมีความรุนแรงมากขึ้น จึงทำให้มีความ

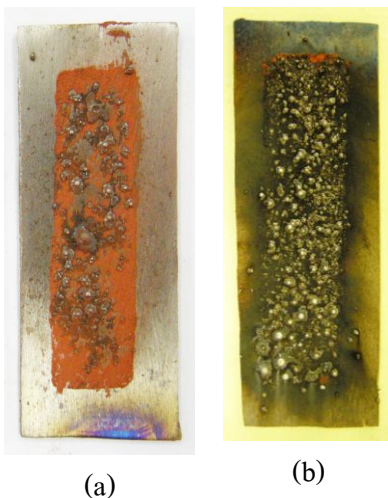
ร้อนในระบบมากพอที่จะทำให้การยึดเกาะบนผิววัสดุฐานดีกว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย แต่ด้วยความรุนแรงของปฏิกิริยาจึงทำให้เกิดการประทุและกระเด็นของเฟสผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จนทำให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความต่อเนื่องกันน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 33



รูปที่ 33 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้สารละลายตัวประสานที่มี a) น้ำกลั่น และ b) เอทิลแอลกอฮอล์ เป็นตัวทำละลาย

#### ผลกระทบของการเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง

จากผลการทดลองของตัวแปรทั้งสามข้างต้นจะเห็นว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความขรุขระและมีความแข็งแรงในการยึดเกาะไม่ดีนัก จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มกระบวนการเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างเข้าไปในกระบวนการเคลือบด้วยความร้อน จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงเลือกใช้กระบวนการพ่นทรายในการช่วยให้ผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างมีความหยาบเพิ่มขึ้น ซึ่งจะให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกันระหว่างผิวเคลือบกับผิวชิ้นงานตัวอย่างได้มากขึ้น โดยพิจารณาเปรียบเทียบกัน 2 เงื่อนไขการเตรียมผิวดังนี้ เงื่อนไขที่ 1: ขัดผิวของแผ่นชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 80 และทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และเงื่อนไขที่ 2: ขัดผิวของแผ่นชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษขัดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 80 พ่นด้วยทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ และทำความสะอาดในอะซิโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ดังแสดงในรูปที่ 34



**รูปที่ 34** ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่เตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่างตามเงื่อนไข a) เงื่อนไข 1 และ b) เงื่อนไข 2

จากรูปที่ 34 พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่มีการเพิ่มกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยการพ่นทราย (เงื่อนไข 2) มีความขรุขระน้อยกว่า และมีความต่อเนื่องกันมากกว่า และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานมากกว่า ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นไปตามสมมติฐานที่วางไว้ข้างต้น

#### **ผลกระทบของการให้ความร้อนก่อนการจุ่มเปิดผิวเคลือบตั้งต้น**

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วพบว่า นอกจากการเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบกับผิววัสดุฐาน ได้ด้วยการเพิ่มความหยาบของผิววัสดุฐานแล้ว จะสามารถเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะได้ด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ชิ้นงานตัวอย่างก่อนทำการจุ่มเปิดผิวเคลือบตั้งต้นเพื่อเริ่มปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มให้ระบบการสังเคราะห์นี้จะเข้าไปช่วยเสริมให้ผิวเคลือบมีการหลอมเยิ้ม และเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้การเปียกของเฟสผลิตภัณฑ์บนผิวชิ้นงานตัวอย่างดีขึ้น และทำให้ผิวเคลือบสัมผัสกับผิววัสดุฐานได้มากขึ้น ดังนั้นผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จึงมีความขรุขระของผิวเคลือบน้อยลง และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุตั้งต้น



รูปที่ 35 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลอง a) ไม่มีการให้ความร้อนก่อนการจุ่มระเบิดผิวเคลือบตั้งต้น และ b) มีการให้ความร้อนก่อนการจุ่มระเบิดผิวเคลือบตั้งต้น

จากรูปที่ 35 พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในระบบที่มีการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ชิ้นงานตัวอย่าง มีความขรุขระของผิวน้อยลง และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานดีขึ้นจริงตามที่ได้วางสมมติฐานไว้

#### ผลกระทบของสารตัวเติมที่เติมในส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์

จากการศึกษาตัวแปรทั้งห้าตัวข้างต้นจะเห็นว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะต้องมีการปรับปรุง เพื่อให้ผิวเคลือบมีความขรุขระน้อยลง มีความต่อเนื่องกันมากขึ้น และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานดีขึ้น จึงทำการศึกษาหาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีการสำหรับการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวให้ดีขึ้นพบว่า การเติมสารตัวเติมลงไปในส่วนผสมตั้งต้น เพื่อให้สารตัวเติมเหล่านั้นช่วยเสริมให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้หลอมเยิ้มและสัมผัสกับผิววัสดุฐานได้ดีขึ้น

ในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในสารละลายตัวประสาน ศึกษาโดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่ทำการเติมและไม่เติมอะลูมินาเป็นสารตัวเติมในระบบสารตั้งต้น



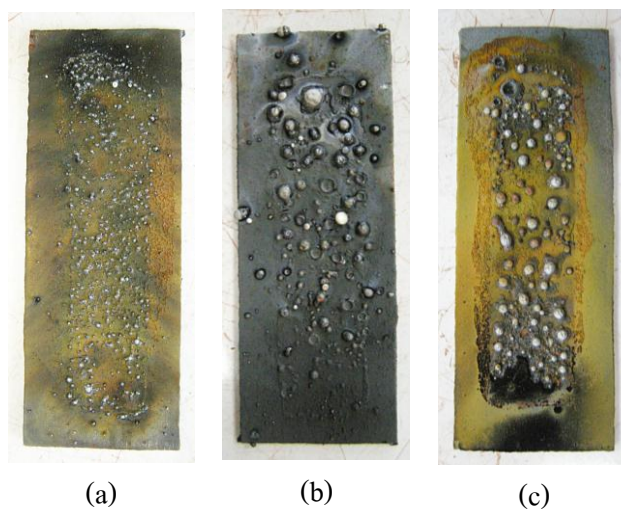
(a)

(b)

รูปที่ 36 ผิวนูนที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและเติม a) ไม่เติมสารตัวเติม และ b) 1 โมลอะลูมิเนียม

จากผลรูปที่ 36 พบว่า ผิวนูนที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นที่มีการเติม 1 โมลอะลูมิเนียม มีความขรุขระของผิวมากกว่า แต่มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานดีกว่าผิวนูนที่ได้จากส่วนผสมตั้งต้นในระบบที่ไม่มีการเติมอะลูมิเนียม เนื่องจากอะลูมิเนียมจะเข้าไปช่วยให้ความร้อนสะสมในระบบการสังเคราะห์มากขึ้น ผิวนูนที่สังเคราะห์ได้จึงสามารถเปียกบนผิววัสดุฐานได้

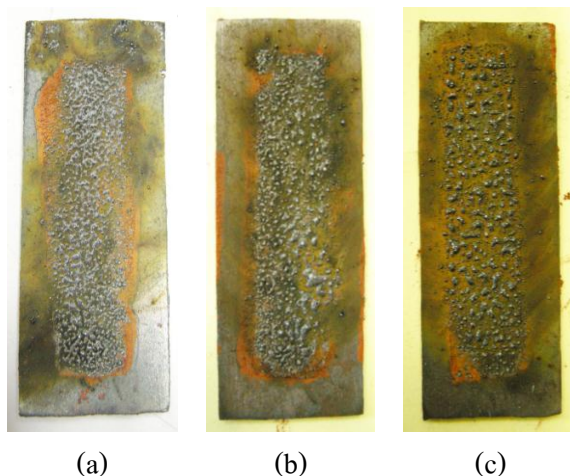
ในระบบที่ใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายในสารละลายตัวประสาน ศึกษาโดยพิจารณาเปรียบเทียบกันในระบบที่ทำการเติมอะลูมิเนียม เติมเหล็ก และไม่เติมสารตัวเติมในระบบสารตั้งต้น



รูปที่ 37 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้เอทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายและเติม a) ไม่เติมสารตัวเติม b) 1 โมลอะลูมิเนียม และ c) 1 โมลเหล็ก

จากรูปที่ 37 พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในระบบที่ทำการเติมอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานดีที่สุดในทั้งสามระบบที่ศึกษานี้ เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเหล็ก จึงทำให้ความร้อนที่ใช้ในการทำให้ตัวเองหลอมเหลวและเกิดปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงมีน้อยกว่าเหล็ก ส่งผลให้มีความร้อนในระบบการสังเคราะห์เพียงพอต่อการทำให้ผิวเคลือบนั้นหลอมเยิ้มและเกาะติดได้ดีบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง นอกจากนี้ความร้อนดังกล่าวยังช่วยให้มีการแยกเฟสของเฟสอะลูมิเนียมออกจากเฟสของโลหะผสมได้อย่างชัดเจนอีกด้วย

และนอกจากนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยการเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ ( $\text{CaF}_2$ ) ลงในส่วนผสมตั้งต้นที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยเติมในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่า ผิวเคลือบที่มีการเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดความรุนแรงมากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 38 ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมฟลูออไรด์ช่วยให้อะลูมิเนียมหลอมเหลวได้ง่ายขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดการประทุอย่างรุนแรงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์บางส่วนกระเด็นออกไปในระหว่างทำปฏิกิริยา ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จึงมีผิวที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอและมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานตัวอย่างน้อยลงไปตามลำดับ



รูปที่ 38 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและเติม a) ไม่เติมสารตัวเติม b) แคลเซียมฟลูออไรด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และ c) แคลเซียมฟลูออไรด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

#### ผลกระทบของลักษณะของส่วนผสมตั้งต้น

ด้วยเหตุผลที่ความร้อนในระบบการสังเคราะห์ผิวเคลือบไม่เพียงพอในกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการเคลือบด้วยความร้อน โดยใช้ส่วนผสมตั้งต้นที่เป็นผง เพื่อหาวิธีในการหลีกเลี่ยงการขัดขวางในการเข้าทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นจากตัวประสาน และเพื่อให้ความร้อนในส่วนนั้นกลับมาเติมเต็มให้กับปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อศึกษาตามที่ตั้งสมมติฐานไว้พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความพรุนตัวสูง และมีการจับกลุ่มกันเป็นเม็ดๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการศึกษาในระบบที่ใช้สารตั้งต้นที่เป็นคอลลอยด์ แต่ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้จะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบการสังเคราะห์มีมากเพียงพอต่อการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์หลอมเยิ้มและเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้อย่างแนบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 39

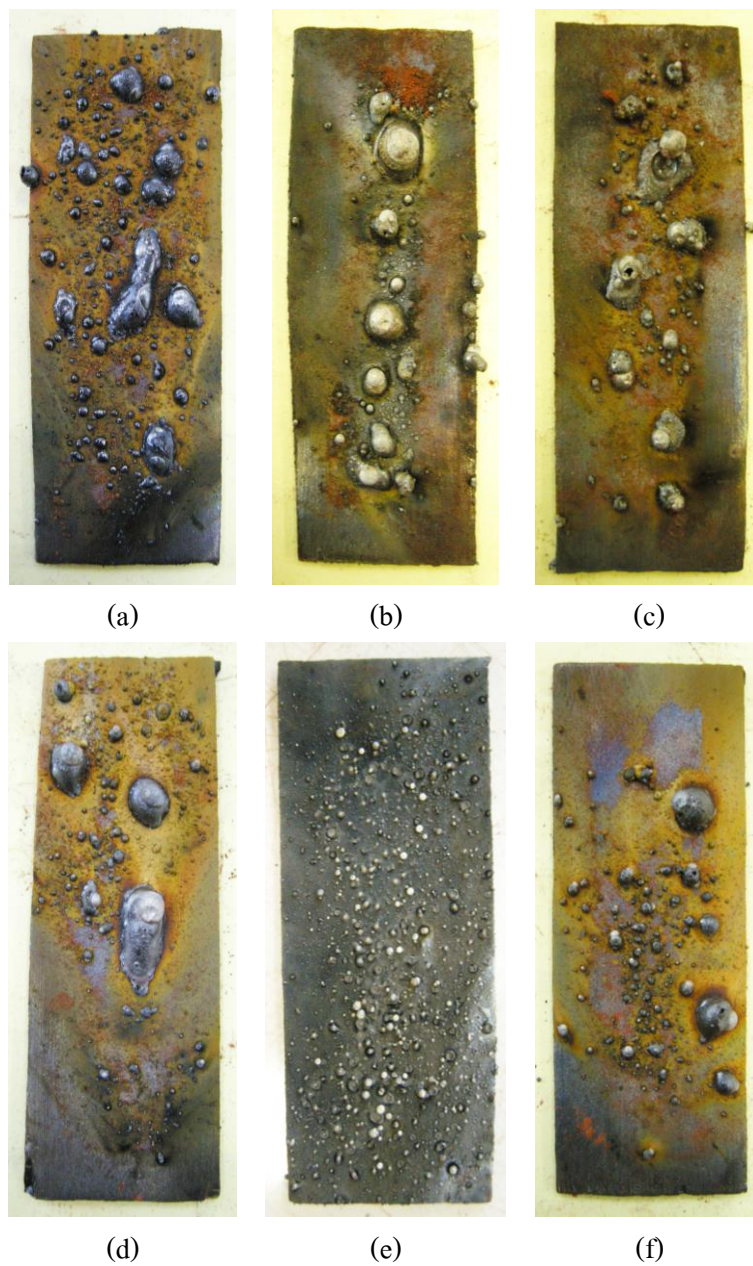


รูปที่ 39 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นเป็น a) ผง และ b) คอลลอยด์

#### ผลกระทบของสารตัวเติม ที่ใช้ในส่วนผสมตั้งต้นชนิดผง

เมื่อต้องการปรับปรุงให้ผิวเคลือบของมีความขรุขระน้อยลง และมีความต่อเนื่องกันมากขึ้น สามารถทำได้โดยการเติมสารตัวเติมบางตัวลงไปในส่วนผสมตั้งต้น เพื่อให้สารตัวเติมดังกล่าวเข้าไปช่วยลดความรุนแรงของปฏิกิริยาของสารตั้งต้น ทำให้ผิวเคลือบสามารถยึดเกาะบนผิวชิ้นงานตัวอย่างได้มากขึ้น และมีความต่อเนื่องมากขึ้น

สารตัวเติมที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ อะลูมินา ไทเทเนียมไดออกไซด์ โบรอนออกไซด์ อะลูมิเนียม และเหล็ก โดยผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 40

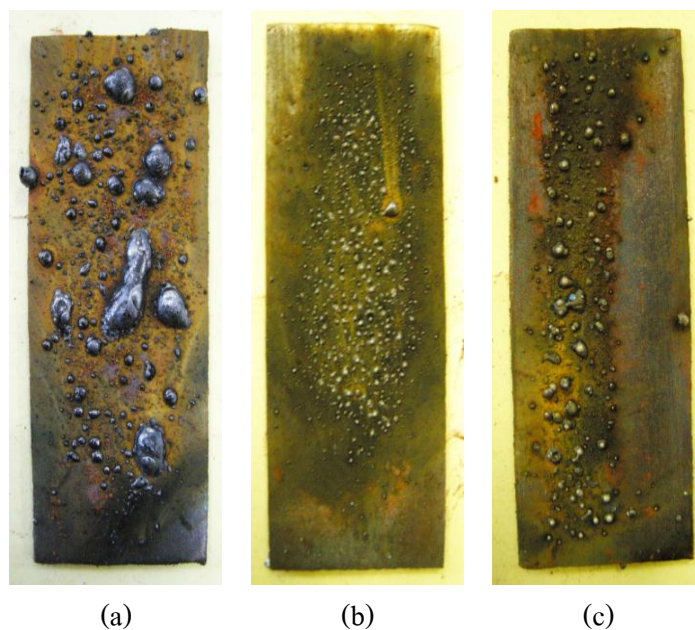


รูปที่ 40 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่เติม a) ไม่เติมสารตัวเติม b) 0.2 โมล อะลูมินา c) 0.3 โมล อะลูมินา

จากรูปที่ 40 พบว่า ผิวเคลือบที่ได้จากระบบที่มีการเติมอะลูมินาจำนวน 0.3 โมล เป็นผิวเคลือบที่มีการสัมผัสกับผิววัสดุฐานได้ดีที่สุด และมีการแยกเฟสของเฟสอะลูมินาออกจากเฟสโลหะผสมได้อย่างชัดเจนที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่สารตั้งต้นมีอุณหภูมิแอเดียแบติกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแอเดีย -

เบตริกของสารตั้งต้นในระบบเหล่านี้ จึงทำให้เฟสผลิตภัณฑ์ที่ก่อรูปขึ้นมีความร้อนมากพอที่จะเกิดการหลอมเยิ้มและเกาะติดบนผิวชิ้นงานได้ง่าย และสามารถแยกเฟสอะลูมิเนียมออกได้อย่างชัดเจน

และมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ลงในส่วนผสมตั้งต้นด้วย ซึ่งทำการเติมในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 1 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าผิวเคลือบในระบบที่มีการเติมแคลเซียมฟลูออไรด์ในปริมาณที่มากขึ้น ปฏิกริยาของสารตั้งต้นมีความร้อนมากพอที่จะทำให้เม็ดผิวเคลือบมีขนาดเล็กกว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองข้างต้นนี้ และมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานตัวอย่างดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 41 เนื่องจากแคลเซียมฟลูออไรด์ช่วยให้การหลอมเหลวของอะลูมิเนียมเกิดได้ง่ายขึ้น และช่วยให้ปฏิกริยาของสารตั้งต้นเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 41 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่เติม a) ไม่เติมสารตัวเติม b) แคลเซียมฟลูออไรด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และ c) แคลเซียมฟลูออไรด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

#### ผลกระทบของความหนาของผิวเคลือบตั้งต้น (ระบบที่ใช้สารตั้งต้นชนิดผง)

จากงานวิจัยของ Muye และคณะ และ Xuanyi และคณะ พบว่า ความหนาของชั้นผิวเคลือบตั้งต้นควรมีความหนาเพิ่มขึ้นจากเดิมที่เคยศึกษาในข้างต้น เพื่อให้ความร้อนในระบบมีปริมาณมากพอในการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์หลอมเยิ้มและเกาะติดบนผิววัสดุฐาน และสามารถก่อรูปเป็นเฟสผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนการเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการเคลือบผิวดังต่อไปนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นตามสัดส่วนในปฏิกิริยาเคมีที่ใช้งาน จำนวน 20 g
2. บดผสมผงสารตั้งต้นให้เข้ากันด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. นำแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมผิวมาแล้วในเงื่อนไขการเตรียมผิวที่ดี วางในแม่พิมพ์แกรไฟต์
4. โรยผิวหน้าของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่างด้วยผงนิกเกิล และเทพงผสมตั้งต้นตามลงไปจนเต็มแม่พิมพ์
5. อัดผสมตั้งต้นให้มีความแน่นตัวด้วยเครื่องอัดในแนวแกนเดียว โดยใช้แรงอัดขนาดเท่ากับ 30 kN
6. ให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้อุณหภูมิที่ 400 °C เป็นเวลานาน 2 นาที
7. จุกระเบิดด้วยเปลวไฟออกซิ - อะเซทิลีน จะได้ผิวเคลือบวัสดุผสมดังแสดงในรูปที่ 3.15(b)

จากการทดลองนี้พบว่า ผิวเคลือบที่ก่อรูปขึ้นมีการยึดเกาะบนผิวของวัสดุฐานได้มากกว่า ชิ้นงานตัวอย่างในระบบต่างๆ ที่ได้ทดลองในข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 42



(a)



(b)

**รูปที่ 42** ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองในระบบที่มีความหนาของผิวเคลือบตั้งต้นเท่ากับ a) 1 mm และ b) 3 mm

เมื่อทำการทดลองเติมสารตัวเติมต่างๆ เช่น อะลูมิเนียม อะลูมินา เหล็ก โบรอน - ออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่มีการเติมอะลูมินาจำนวน 1 โมล เป็น

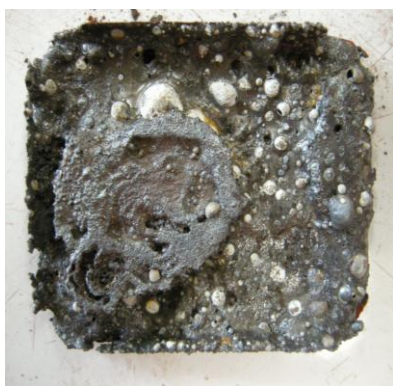
ผิวเคลือบที่เฟสผลิตภัณฑ์สามารถเชื่อมต่อกันเป็นผิวเคลือบที่มีความหนาประมาณ 3 mm ได้และมีการยึดเกาะบนผิววัสดุฐานได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับในทั้งสามระบบดังแสดงรูปที่ 43 เนื่องจากเป็นระบบที่สารตั้งต้นมีอุณหภูมิแอเดียแบติกที่เพียงพอต่อการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์ก่อรูปขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และมีความร้อนสะสมในระบบการสังเคราะห์มากพอในการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์หลอมเต็มและสามารถเกาะติดบนผิววัสดุฐานได้ง่าย จึงส่งผลให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวของวัสดุฐานที่ดีดังแสดงในรูปที่ 43(d)



(a)



(b)



(c)



(d)

**รูปที่ 43** ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่เติม a) ไม่เติมสารตัวเติม b) 1 โมล อะลูมิเนียม c) 1 โมล อะลูมินา และ d) ภาพถ่ายด้านข้างของระบบที่เติม 1 โมล อะลูมินา

จากการทดลองทั้งหมดในกระบวนการเคลือบด้วยความร้อน สามารถสรุปผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

#### ตารางที่ 4 สรุปผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

ตัวแปร	เงื่อนไขที่ดี
ความหนาของแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง	1.2 mm
ความหนาของผิวเคลือบตั้งต้น	1 mm
ตัวประสาน	
- ชนิดของตัวประสาน	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)
- สัดส่วนของตัวประสาน	ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
- ตัวทำละลาย	น้ำกลั่น
การเตรียมผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง	เพิ่มการพ่นทรายที่ผิวแผ่นเหล็กกล้าตัวอย่าง
การให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ชิ้นงานตัวอย่าง	มีการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ชิ้นงานตัวอย่าง
สารตัวเติม	สารตัวเติมที่ให้ผลดีที่สุด คือ อะลูมินา

#### กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

##### ผลการพ่นเคลือบเบื้องต้น

จากการศึกษากระบวนการพ่นเคลือบเบื้องต้นพบว่า ผงผสมตั้งต้นที่ผลิตได้จากสัดส่วนของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเคมีจากสมการที่ 3 ไม่สามารถใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบได้ด้วยหัวพ่นเคลือบที่มีอยู่ จึงทำการคัดขนาดของผงผสมตั้งต้นให้มีขนาดดังต่อไปนี้

6. ขนาดใหญ่กว่า 105  $\mu\text{m}$
7. ขนาด 75 - 105  $\mu\text{m}$
8. ขนาด 53 - 75  $\mu\text{m}$
9. ขนาด 45 - 53  $\mu\text{m}$
10. ขนาดเล็กกว่า 45  $\mu\text{m}$

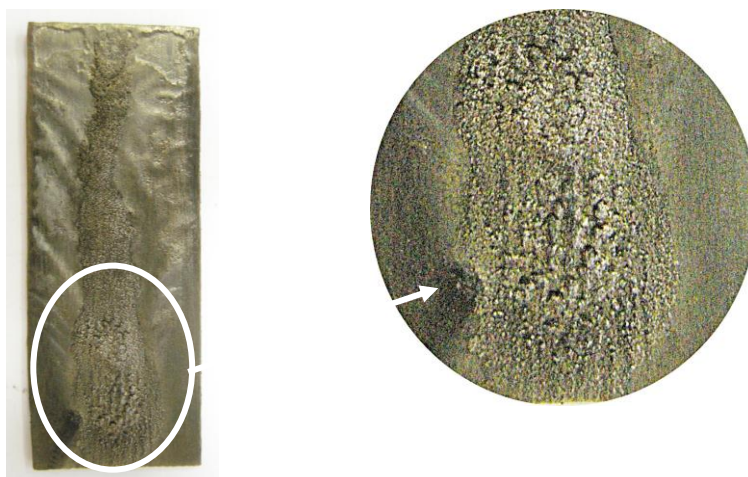
จากนั้นนำผงผสมตั้งต้นในแต่ละช่วงขนาดไปทดลองพ่นเคลือบด้วยหัวพ่นพบว่า ผงผสมตั้งต้นที่สามารถพ่นออกมาได้ด้วยหัวพ่นที่มีอยู่เป็นผงผสมตั้งต้นที่มีขนาดเล็กกว่า 75  $\mu\text{m}$  แต่ผงที่พ่นออกมาได้นั้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากผงผสมตั้งต้นที่ผลิตได้นั้นมีการไหลตัวได้น้อยมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ทราบว่า การไหลตัวของผงผสมตั้งต้นมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อกระบวนการพ่นเคลือบ

ต่อมาจึงหันมาให้ความสำคัญต่อสมบัติการไหลตัวของผงผสมตั้งต้น โดยการเลือกใช้ปฏิกิริยาเคมีที่มีสารตั้งต้นที่มีสมบัติในการหล่อลื่นสูง เช่น นิกเกิล โบรอนออกไซด์ และคาร์บอน ดังแสดงในสมการที่ 8 ถึง 12 มาใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบ

### ผลกระทบของระบบสารตั้งต้น

จากการนำผงผสมตั้งต้นที่ผลิตได้จากระบบสารตั้งต้นในสมการที่ 8 ถึง 12 พบว่า มีเพียงสองระบบเท่านั้นที่สามารถพ่นออกมาได้อย่างต่อเนื่อง นั่นคือ ระบบสารตั้งต้นในสมการที่ 10 และ 11

เมื่อทำการทดลองพ่นเคลือบผงผสมตั้งต้นที่ได้จากระบบสารตั้งต้นในสมการที่ 10 จะได้ผิวเคลือบที่มีลักษณะดังรูปที่ 44



รูปที่ 44 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการพ่นเคลือบผงผสมตั้งต้นบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา 1.2 mm

จากรูปจะเห็นว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยความร้อน แต่ชิ้นงานตัวอย่างมีการเปลี่ยนรูปไปบางส่วนเนื่องจากมีความร้อนสะสมในชิ้นงานตัวอย่างมากเกินไปขณะที่ทำการพ่นเคลือบ ทำให้สมบัติของชิ้นงานตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป

### ผลกระทบของระยะการพ่นเคลือบ

จากการทดลองพ่นเคลือบที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ความร้อนสะสมบนชิ้นงานตัวอย่างในปริมาณที่มากเกินไปขณะทำการพ่นเคลือบมีผลกระทบต่อการสมบัติของวัสดุฐาน จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะที่ใช้ในการพ่นเคลือบ เพื่อให้ทราบถึงระยะพ่นที่เหมาะสมต่อการก่อรูปของเฟสผลิตภัณฑ์ และเคลื่อนตัวไปเกาะบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างโดยไม่ทำให้วัสดุฐานมีสมบัติที่ด้อยลง

เมื่อทำการทดลองพ่นเคลือบผงผสมตั้งต้นที่ได้จากระบบสารตั้งต้นในสมการที่ 10 และทำการแปรค่าระยะห่างระหว่างหัวพ่นกับผิวชิ้นงานตัวอย่างเป็น 5 และ 20 mm จะได้ผิวเคลือบที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 45

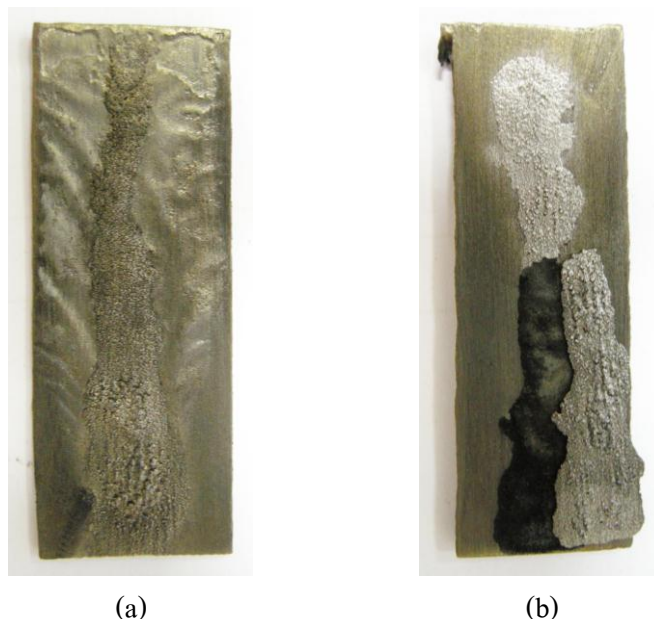


(a)

(b)

รูปที่ 45 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองที่มีระยะการพันเคลือบเท่ากับ a) 5 mm และ b) 20 mm

จากรูปจะเห็นว่า ผิวเคลือบที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระยะพันเคลือบเท่ากับ 20 mm มีความสม่ำเสมอและความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวของชิ้นงานตัวอย่างดีกว่าผิวเคลือบที่ได้จากการทดลองที่ใช้ระยะพันเคลือบเท่ากับ 5 mm แต่เมื่อทำการทดลองพันเคลือบลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ 1.2 mm และ 3 mm โดยใช้ระยะพันเคลือบเท่ากับ 5 mm เช่นกัน พบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีความสม่ำเสมอเท่าๆ กัน แต่ผิวเคลือบที่เคลือบบนผิวชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา 1.2 mm มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานตัวอย่างดีกว่าผิวเคลือบที่เคลือบบนผิวชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนา 3 mm เนื่องจากชิ้นงานที่มีความหนามากกว่ามีพื้นที่ในการสะสมความร้อนมากกว่า ทำให้ความร้อนสะสมในชิ้นงานตัวอย่างในปริมาณมากจนทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่า และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชิ้นงานที่หนากว่ามีความร้อนไม่เพียงพอต่อการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์ที่เคลือบตัวมาเกาะได้ติดบนผิวชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 46(b)



รูปที่ 46 ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ a) ชั้นงานตัวอย่างหนา 1.2 mm และ b) ชั้นงานตัวอย่างหนา 3 mm

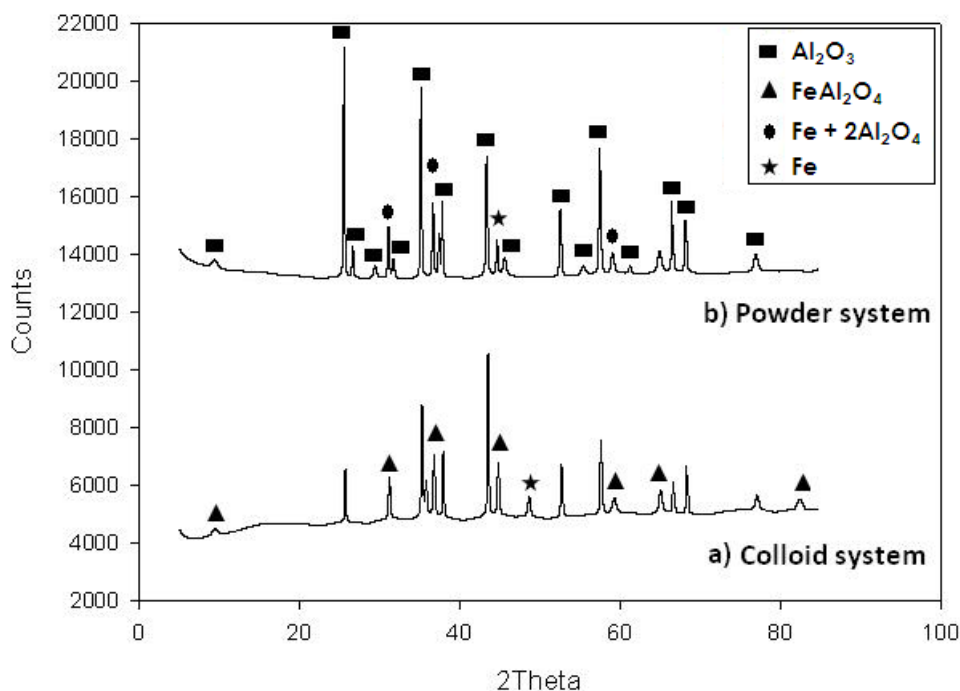
ดังนั้นในกระบวนการพ่นเคลือบควรเลือกชั้นงานที่มีความหนาน้อยๆ และควรศึกษาหา  
ระยะการพ่นเคลือบที่เหมาะสมก่อนทำการพ่นเคลือบลงบนชิ้นงานจริง เพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีประสิทธิภาพ  
ที่ดีที่สุด

### ผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบ

#### กระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

##### ผลการทดลองในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์

จากผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์  
(XRD) พบว่า เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบประกอบด้วยเฟส Fe อีสระ เฟส  $Al_2O_3$  และเฟส  $Fe + Al_2O_3$  ซึ่ง  
เป็นไปตามผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.1 และจากผลการวิเคราะห์นี้  
พบว่า เฟสของตัวประสานไม่มีเหลืออยู่ในเฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ เพราะขณะที่ทำการ  
สังเคราะห์ผิวเคลือบนั้นมีความร้อนเกิดขึ้นในระบบมากเกินจุดหลอมเหลวของตัวประสานเหล่านี้ และมาก  
จนทำให้สามารถกำจัดตัวประสานออกไปได้อย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 47



รูปที่ 47 ผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ของผิวเคลือบในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ (กราฟเส้น (a)) และชนิดผง (กราฟเส้น (b))

#### ผลการทดลองในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผง

จากผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 47 พบว่า เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบประกอบด้วยเฟส Fe เฟส Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และเฟส FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 เช่นกัน

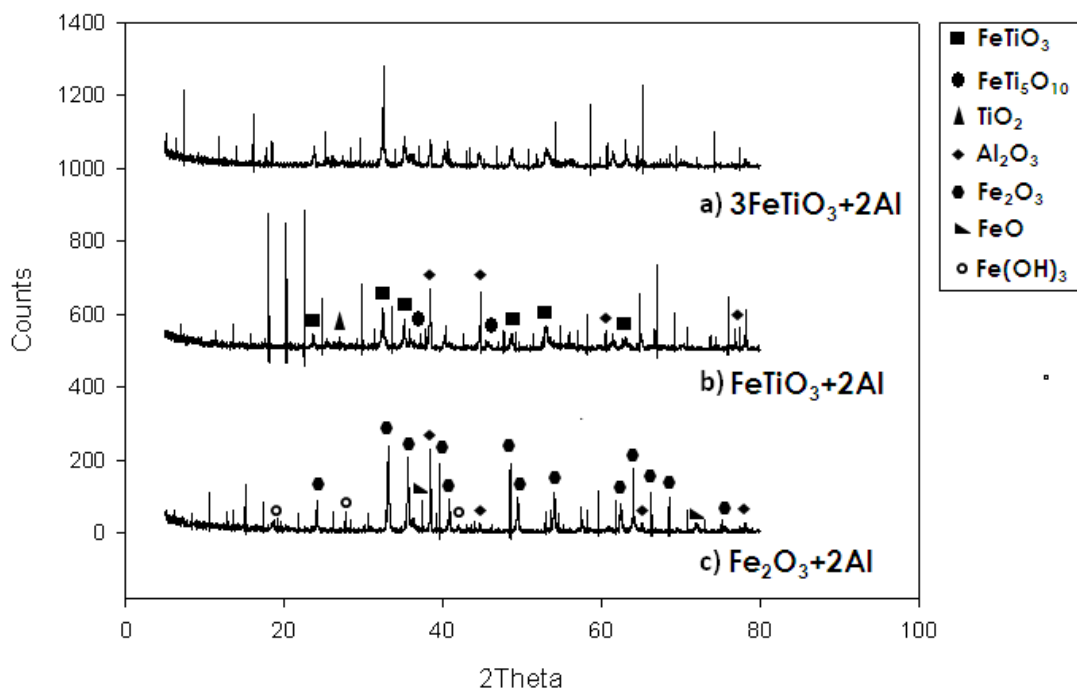
จากผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) ของทั้งสองระบบข้างต้นพบว่า ทั้งสองระบบการสังเคราะห์จะให้ผิวเคลือบที่มีเฟสผลิตภัณฑ์ที่เหมือนกัน ต่างกันเพียงเฟสระหว่างกลาง (intermediate phase) โดยระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผงจะให้เฟสกึ่งกลางเป็น Fe + 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งเฟสผลิตภัณฑ์มีความใกล้เคียงกับเฟสผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมาก ดังนั้นเมื่อมีความร้อนในระบบการสังเคราะห์มากขึ้น จะทำให้เฟสผลิตภัณฑ์ก่อรูปได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น นั่นคือ เฟสผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยเหล็ก และอะลูมินาเท่านั้น สำหรับระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ เฟสกึ่งกลางที่เกิดขึ้น คือ FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ซึ่งจะต้องใช้ความร้อนในระบบการสังเคราะห์มากกว่าระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผง เพื่อให้เฟสระหว่างกลางนี้ก่อรูปเป็นเฟสผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ และจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นนี้ทำให้ทราบว่า ระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผงมีความร้อนเกิดขึ้นมากกว่าระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ เนื่องจากเป็นระบบนี้ไม่มีตัวประสานเข้ามาขัดขวางการดำเนินไปของปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง ขณะมีการทำปฏิกิริยากันของผิวเคลือบตั้งต้น ดังนั้นในการ

นำไปใช้จริงจะต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นเหมาะสมต่อการก่อรูปอย่างสมบูรณ์ของเฟสผลิตภัณฑ์

### กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

ในการศึกษาองค์ประกอบของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างจากการทดลองพ่นผงสารตั้งต้นในระบบที่มีสารตั้งต้นดังสมการที่ 10 และ 11 ผ่านเปลวไฟ และปล่อยให้ตกลงไปเย็นตัวในน้ำ จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD นอกจากนี้ได้ทำการทดลองโรยผงสารตั้งต้นในระบบที่มีสารตั้งต้นดังสมการที่ 3 ผ่านเปลวไฟ เพื่อจุดระเบิดให้เกิดการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้น ก่อนจะปล่อยให้ตกลงไปเย็นตัวในน้ำ และนำผงผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเช่นกัน พบว่า ระบบที่ใช้ผงผสมตั้งต้นที่มีเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นส่วนประกอบ (สารตั้งต้นในสมการที่ 3) มีองค์ประกอบทางเคมีตรงตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ แต่ในการวิเคราะห์ผลพบว่า มีเฟสของเหล็กไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) ปรากฏขึ้น เนื่องจากเฟสของผลิตภัณฑ์ที่มีความร้อนสูงมาก เคลื่อนตัวลงไปประทะกับน้ำอย่างฉับพลันและเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำขึ้น ส่งผลให้ปรากฏเฟสดังกล่าวขึ้นในการวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 48

และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างในระบบที่ผสมตั้งต้นมีอิลเมไนต์ ( $FeTiO_3$ ) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นสารตั้งต้นพบว่า ระบบที่มีอิลเมไนต์ในผสมตั้งต้นปริมาณที่มากกว่า จะทำให้ก่อรูปเป็นเฟสผลิตภัณฑ์ตรงตามที่ต้องการได้น้อยกว่า เนื่องจากระบบสารตั้งต้นทั้งสองระบบนี้มีอุณหภูมิแอดิบดีกต่ำกว่าระบบแรกเป็นอย่างมาก ทำให้มีความร้อนไม่เพียงพอในการทำให้สารตั้งต้นนั้นเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดเฟสระหว่างกลาง (Intermediate phase) ขึ้น ในที่นี้คือ  $FeTi_5O_{10}$  และยังคงมีสารตั้งต้นหลงเหลืออยู่ในระบบปริมาณมากดังแสดงในรูปที่ 48 เช่นกัน



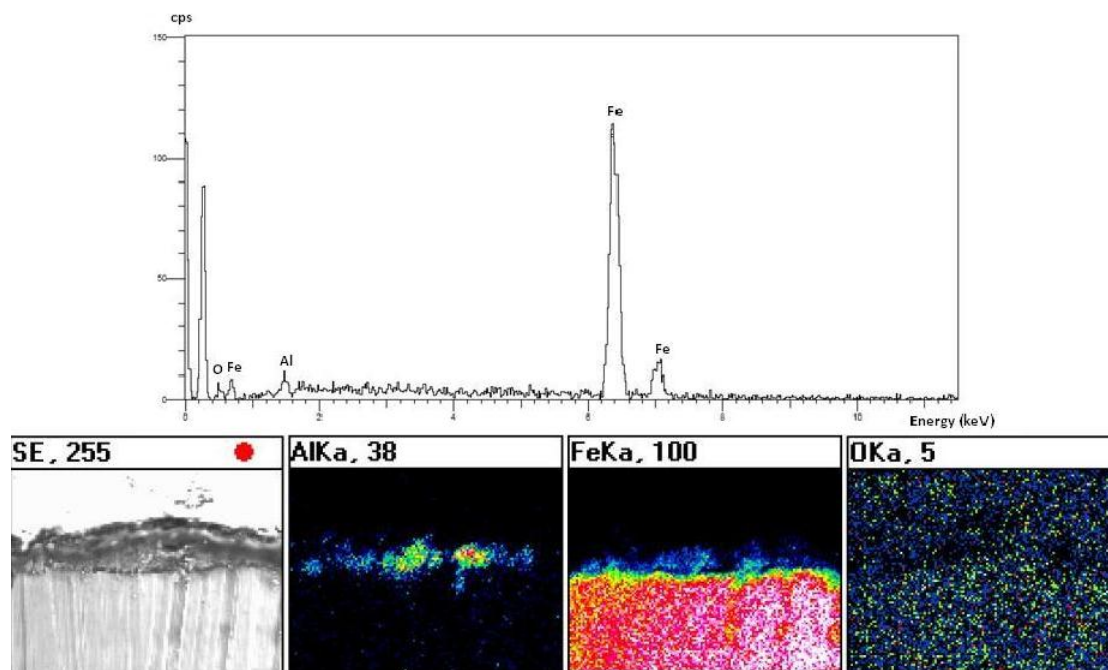
รูปที่ 48 ผลการวิเคราะห์เฟสผลิตภัณฑ์ผิวเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของผงผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ

กระบวนการเคลือบด้วยความร้อน

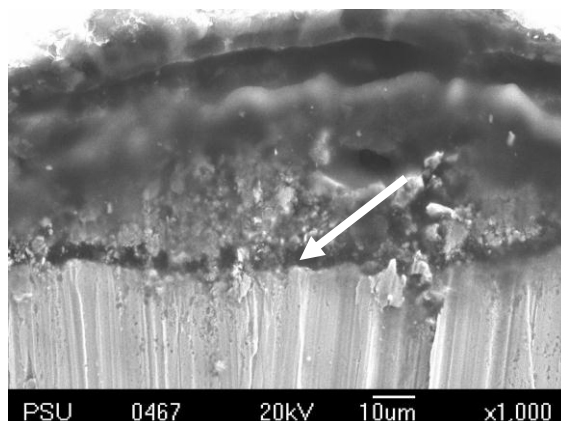
ผลการทดลองในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDX พบว่า ธาตุเหล็ก (Fe) มีการเกาะกลุ่มกัน ในบริเวณที่เป็นวัสดุฐาน และกระจายตัวอยู่ตามแนวของผิวหน้าของวัสดุฐาน ส่วนธาตุอะลูมิเนียม (Al) มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนตรงใจกลางของชั้นผิวเคลือบดังแสดงในรูปที่ 49



**รูปที่ 49** ผลการวิเคราะห์การกระจายค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ ซึ่งแสดงถึงปริมาณของธาตุ (รูปบน) และแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของธาตุ (รูปล่าง) (หมายเหตุ: บริเวณสีแดง คือ บริเวณที่มีปริมาณของธาตุนั้นๆ กระจายอยู่มาก)

และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีการแยกตัวออกจากผิววัสดุฐานเล็กน้อย (บริเวณที่มีลูกศรชี้อยู่ในรูปที่ 50) ซึ่งเป็นเหตุผลมาจากความร้อนในระบบการสังเคราะห์ผิวเคลือบมีไม่เพียงพอต่อการทำให้เฟสผลิตภัณฑ์หลอมเชื่อมและเกาะติดบนผิวของวัสดุฐานได้อย่างแนบสนิท

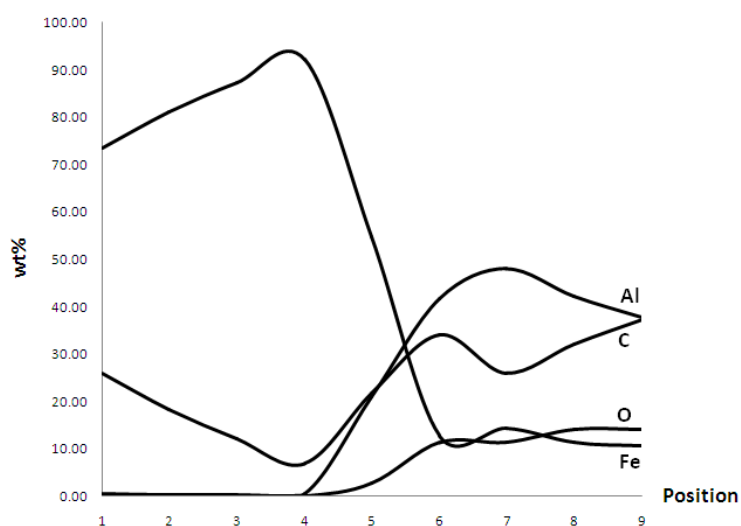


รูปที่ 50 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม และมีผิวเคลือบตั้งต้นหนา 1 mm

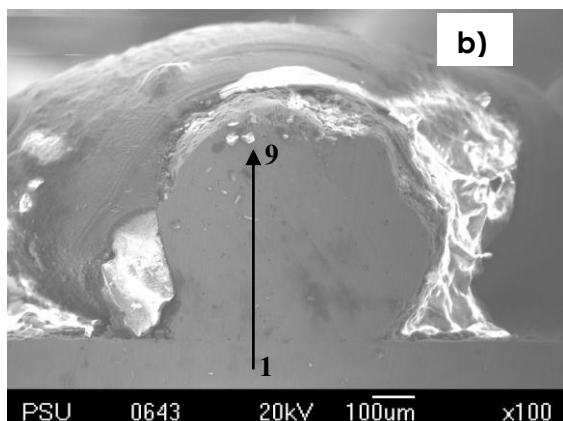
#### ผลการทดลองในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผง

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบด้วยเทคนิค EDX พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยธาตุเหล็ก (Fe) ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ธาตุคาร์บอน (C) และธาตุออกซิเจน (O) และสามารถนำมาสร้างกราฟความเข้มข้นของธาตุในตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่

51



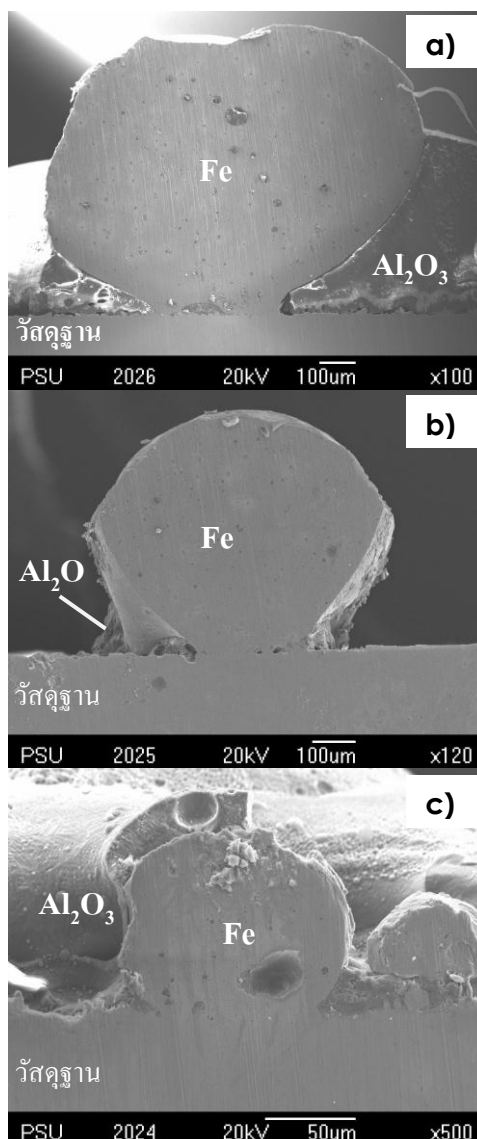
รูปที่ 51 (a) ผลการวิเคราะห์การกระจายค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ



รูปที่ 51 (ต่อ) และ (b) ตำแหน่งที่วัดค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ

ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานของธาตุจะทำการวิเคราะห์ทั้ง 9 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1 - 4 เป็นบริเวณที่เป็นวัสดุฐาน และตำแหน่งที่ 5 - 9 เป็นบริเวณที่เป็นผิวเคลือบวัสดุผสม และจากกราฟในรูปที่ 51(a) พบว่า ธาตุเหล็กมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อทำการวัดค่าพลังงานจากตำแหน่งที่ 1 จนถึงตำแหน่งที่ 4 ธาตุเหล็กจะมีปริมาณน้อยลงเรื่อยๆ จนไปถึงตำแหน่งที่ 9 ทั้งธาตุออกซิเจนและธาตุอะลูมิเนียมไม่มีการปรากฏในตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 4 แต่หลังจากตำแหน่งที่ 4 จนถึงตำแหน่งที่ 9 ปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีการตรวจพบว่า ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของผิวเคลือบด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการเคลือบมีการใช้เปลวไฟ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของแก๊สอะเซทิลีนและแก๊สออกซิเจน

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่ได้จากการทดลองในระบบที่ใช้ชิ้นงานตัวอย่างหนา 1.2 mm ผิวเคลือบตั้งต้นหนา 1 mm และสารตั้งต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการเตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่างต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ และผลกระทบของการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างก่อนการจุ่มเปิดผิวเคลือบตั้งต้นต่อการก่อรูปของผิวเคลือบ ซึ่งแบ่งพิจารณาในระบบที่แตกต่างกัน 3 ระบบดังนี้ ระบบที่ 1 : เตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 และทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (รูปที่ 52(a)) ระบบที่ 2 : เตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ฟันทรายและทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (รูปที่ 52(b)) และระบบที่ 3 : เตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 และทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก และเพิ่มการให้ความร้อนก่อนการจุ่มเปิดแก่ผิวเคลือบตั้งต้น (รูปที่ 52(c))

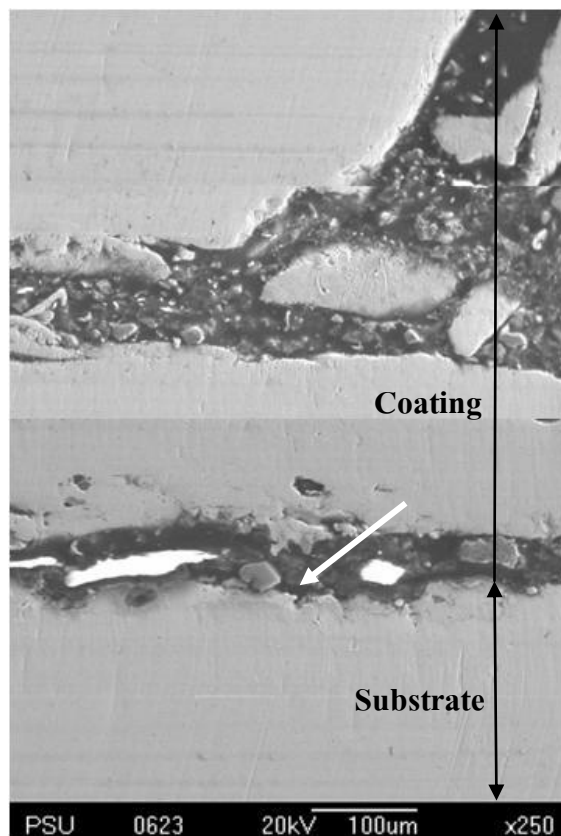


รูปที่ 52 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบจากการทดลอง a) ระบบที่ 1 b) ระบบที่ 2 และ c) ระบบที่ 3

จากรูปที่ 52 พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่มีทั้งการเตรียมผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยการฟันทายและการให้ความร้อนก่อนการจุ่มเปิดผิวเคลือบตั้งต้นเป็นผิวเคลือบที่สัมผัสกันเป็นอย่างดีกับผิวของวัสดุฐาน ซึ่งเป็นไปตามที่ดั่งสมมติฐานไว้ในข้างต้น จึงทำให้ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในระบบที่ 3 นี้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐานที่ดี

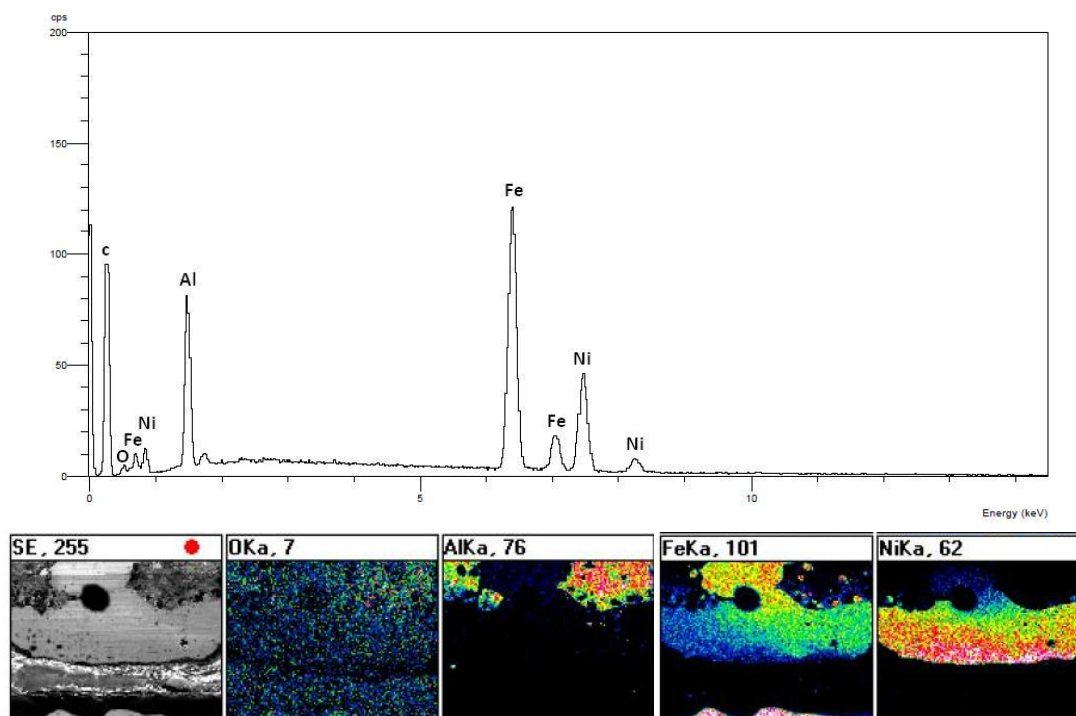
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบร่วมกับโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยเฟสผลิตภัณฑ์สองเฟสคือ เหล็ก และอะลูมินา โดยเฟสผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยเฟสผลิตภัณฑ์ที่เป็นอะลูมินา

จากการศึกษาผลของความหนาของผิวเคลือบตั้งต้นเพิ่มเติมยังพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีเชื่อมต่อกันกลายเป็นผิวเคลือบได้ ดังแสดงในรูปที่ 53



รูปที่ 53 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ในระบบที่มีการเติม 1 โมล อะลูมินา โดยใช้ผิวเคลือบตั้งต้นที่มีความหนาเท่ากับ 3 mm

จากรูปที่ 53 จะเห็นว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้มีความต่อเนื่องของผิวที่ดี เมื่อเทียบกับผิวเคลือบในระบบอื่นๆ จากการศึกษาในข้างต้น และผิวเคลือบนี้ประกอบด้วยเฟสผลิตภัณฑ์ 3 เฟส ได้แก่ เฟสที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ เฟสที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบหลัก และเฟสของอะลูมินา ดังแสดงในรูปที่ 54 และจากรูปพบว่า ผิวเคลือบมีการแยกตัวออกจากผิวของวัสดุฐาน (ดังรูปแสดงในรูปที่ 53 บริเวณที่มีลูกศรสีขาวชี้อยู่)

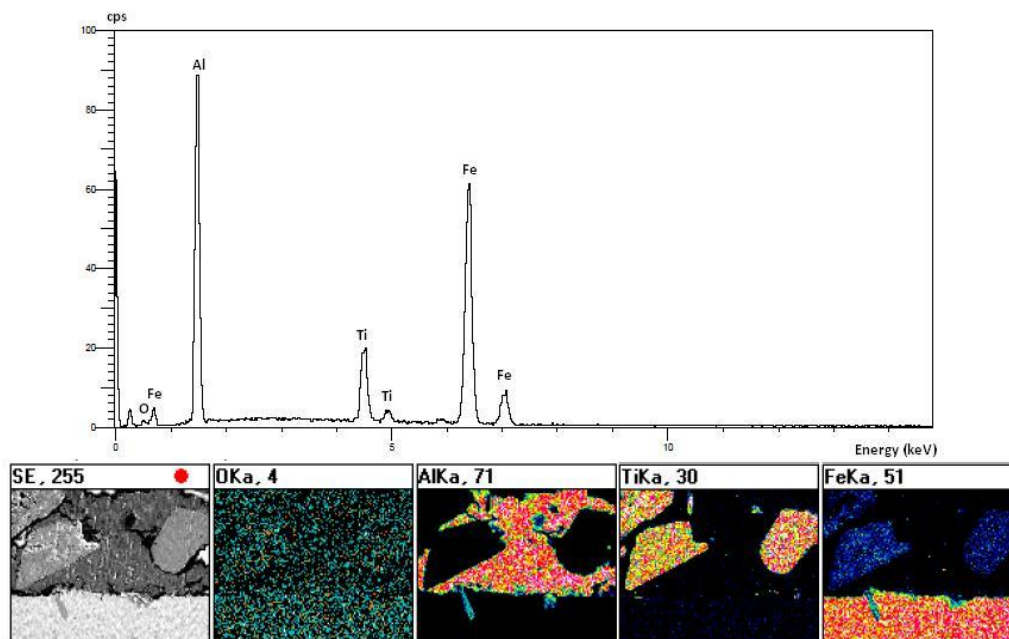


**รูปที่ 54** ผลการวิเคราะห์การกระจายค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ ซึ่งแสดงถึงปริมาณธาตุ (รูปบน) และแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของธาตุ (รูปล่าง) (หมายเหตุ: บริเวณสีแดง คือ บริเวณที่มีปริมาณของธาตุนั้น ๆ กระจายอยู่มาก)

เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของผิวเคลือบพบว่า รอยแยกที่เห็นจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 53) เป็นรอยแยกที่เกิดจากการหดตัวของนิกเกิลในขณะที่มีการแข็งตัวเกิดขึ้น และเฟสผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยสามเฟสดังสมมติฐานที่วางไว้ข้างต้น

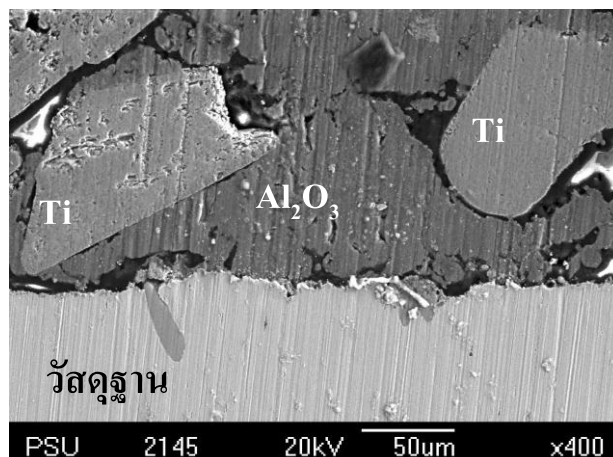
#### กระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อน

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่เตรียมจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 10 ด้วยเทคนิค EDX พบว่า ธาตุเหล็กมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มในบริเวณที่เป็นวัสดุฐาน และธาตุอะลูมิเนียมมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มในบริเวณที่เป็นทางเชื่อมระหว่างกลุ่มก้อนของธาตุไทเทเนียมในชั้นผิวเคลือบดังแสดงในรูปที่ 55



รูปที่ 55 ผลการวิเคราะห์การกระจายค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ (รูปบน) และตำแหน่งที่วัดค่าพลังงานของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผิวเคลือบ (รูปล่าง)

และผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้มีการแยกออกจากกันระหว่างเฟสของผลิตภัณฑ์ และระหว่างผิวเคลือบกับผิวของวัสดุฐานดังแสดงในรูปที่ 56 จึงส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวเคลือบไม่ดีนัก เนื่องจากระบบสารตั้งต้นนี้มีอุณหภูมิแอเดียแบติกที่ต่ำมาก (2053.0 °C) เมื่อเทียบระบบสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 3 ทำให้มีความร้อนในระบบการสังเคราะห์ไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะเคลื่อนตัวไปเกาะบนผิวของวัสดุฐาน เพื่อก่อรูปเป็นผิวเคลือบ



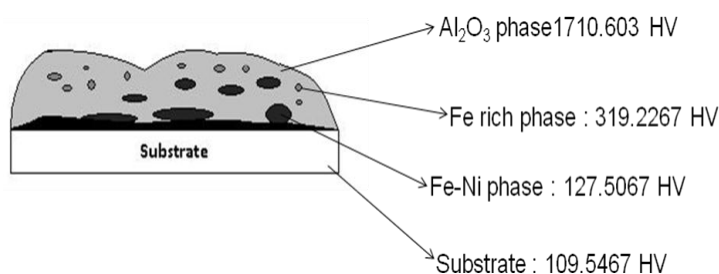
รูปที่ 56 ลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบสารตั้งต้นในสมการที่ 10

#### ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ จะใช้ตัวอย่างที่ผลิตด้วยกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผงที่เติมอะลูมินาจำนวน 1 โมล ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

#### ผลการทดสอบความแข็งของผิวเคลือบ

เมื่อนำผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบความแข็งพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งต่างกันอยู่ในสามช่วง ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของผิวเคลือบพบว่าผิวเคลือบประกอบด้วยเฟสผลิตภัณฑ์สามเฟสเช่นกัน โดยค่าความแข็งในแต่ละเฟสเป็นดังแสดงในรูปที่ 57

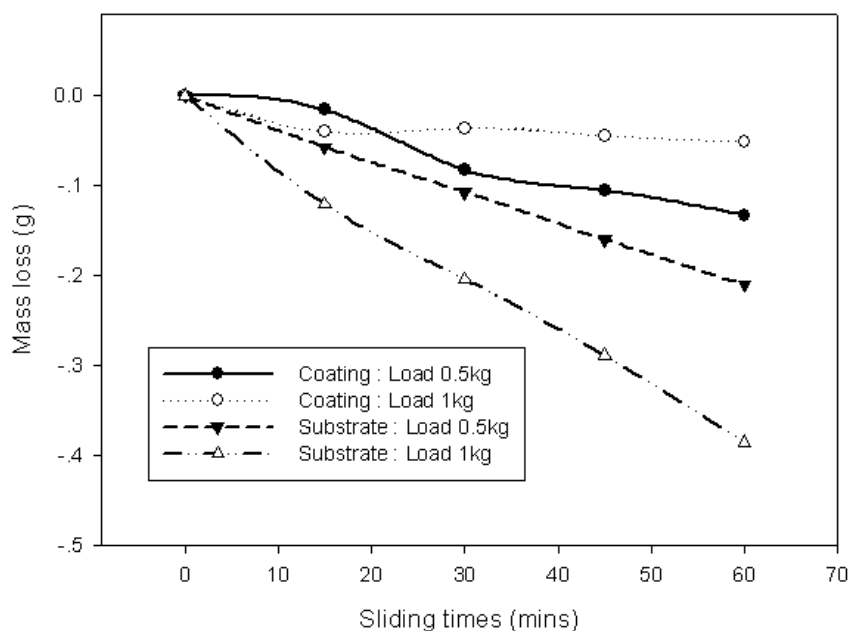


รูปที่ 57 แผนภาพโครงสร้างของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผงที่เติมอะลูมินาจำนวน 1 โมล และค่าความแข็งของแต่ละเฟสผลิตภัณฑ์

จากผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความแข็งแรงสูงกว่าความแข็งแรงของวัสดุฐาน และแต่ละเฟสผลิตภัณฑ์ของผิวเคลือบมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน โดยผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้มีเฟสผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงสูงสุดปกคลุมอยู่ด้านบน และมีเฟสที่มีความแข็งแรงน้อยลงเรียงตามลำดับลงมาจากบนลงล่าง ทำให้บริเวณหน้าสัมผัสที่ติดกับผิววัสดุฐานซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่ำสุดและใกล้เคียงกับความแข็งแรงของวัสดุฐาน ซึ่งหมายความว่าในบริเวณดังกล่าวนี้มีความเหนียวสูง จึงทำให้มีการแยกออกจากกันได้ยาก เมื่อนำไปใช้ในหน่วยงานจริง ซึ่งถือเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานให้แก่ชิ้นงานนั่นเอง

### ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของผิวเคลือบ

เมื่อนำผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ โดยพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ไม่มีภาระถ่วงน้ำหนัก ถ่วงน้ำหนัก 0.5 kg และถ่วงน้ำหนัก 1.0 kg ขณะทำการทดสอบการขัดสี จากค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปขณะทำการขัดสีในช่วงเวลาต่างๆ พบว่า ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุฐานดังแสดงในกราฟรูปที่ 58



รูปที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปขณะทำการขัดสีกับเวลาที่ใช้ในการขัดสีของผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้

## สรุปผล

1 สามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบวัสดุผสม Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สำเร็จได้ด้วยกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนและกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนแบบใช้เปลวไฟที่อาศัยปฏิกิริยาก้าวหน้าด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูง

2 จากการศึกษาผิวเคลือบบนวัสดุฐานเหล็กกล้าที่ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนพบว่า แม้ว่าจะใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดใดก็ตาม ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการก่อรูปของผิวเคลือบบนผิววัสดุฐานก็คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบการสังเคราะห์ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถควบคุมได้ด้วยความหนาของวัสดุฐาน ความหนาของชั้นผิวเคลือบตั้งต้น ระบบของสารตั้งต้น และตัวประสาน

3 เมื่อความหนาของวัสดุฐานและความหนาของชั้นผิวเคลือบตั้งต้นมากขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้น ไปด้วย ส่งผลให้ผิวเคลือบที่ก่อรูปขึ้นมีความขรุขระมากขึ้นและความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างผิวเคลือบและผิววัสดุฐานลดลงตามลำดับ

4 เมื่อเลือกใช้สารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิเฉื่อยที่พอเหมาะกับก่อรูปของผิวเคลือบบนวัสดุฐานผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จะมีสมบัติที่ดีทั้งด้านความเรียบของผิวและความแข็งแรงในการยึดเกาะ

5 ในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดคอลลอยด์ ควรเลือกใช้ตัวประสานเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และตัวทำละลายตัวประสานเป็นน้ำกลั่น เพราะจะสามารถสังเคราะห์ผิวเคลือบที่มีความเรียบสม่ำเสมอ และความแข็งแรงในการยึดเกาะ

6 จากการศึกษาผิวเคลือบบนวัสดุฐานเหล็กกล้าที่ได้จากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนพบว่า ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการก่อรูปของผิวเคลือบคือ ระยะเวลาพ่นเคลือบและขนาดของผงผสมตั้งต้น เนื่องจากระยะเวลาพ่นเคลือบมีผลต่อความร้อนและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของผงผสมตั้งต้น เมื่อความร้อนกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นและการเคลื่อนตัวไปพอกบนผิวของวัสดุฐานมีความสมดุลกัน ผิวเคลือบที่ได้จะมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกับผิววัสดุฐาน และได้เฟสผลิตภัณฑ์ตรงตามที่ต้องการ

นอกจากนี้การไหลตัวของผงผสมตั้งต้นยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการพ่นเคลือบด้วยความร้อนด้วย เนื่องจากการไหลตัวที่ดีของผงผสมตั้งต้นส่งผลให้มีการป้อนผงเข้าสู่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้ก็จะมีคุณภาพต่อเนื่องและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์

7 จากการศึกษาทดลองในทั้งสองกระบวนการพบว่า ผิวเคลือบที่ดีที่สุดที่สังเคราะห์ได้คือ ผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเคลือบด้วยความร้อนในระบบที่ใช้ส่วนผสมตั้งต้นชนิดผงที่มีการเติมอะลูมินาจำนวน 1 โมล และมีการอัดแน่นของผงผสมสารตั้งต้น ผิวเคลือบนี้ประกอบด้วยสามเฟสผลิตภัณฑ์

ที่มีความแข็งแตกต่างกันดังนี้ เฟสที่เป็นอะลูมินามีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 1700 HV เฟสที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 319 HV และเฟสที่มีองค์ประกอบเป็นเหล็กและนิกเกิลมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 127 HV และผิวเคลือบนี้มีความแข็งและความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าวัสดุฐานเหล็กกล้า ซึ่งถือว่าผิวเคลือบที่สังเคราะห์ได้นี้เมื่อมีการปรับปรุงความเรียบของผิวแล้ว จะมีความสามารถที่ดีในการนำไปใช้ในงานจริงได้

### การเผยแพร่ผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการเผยแพร่ใน

- S. Singarothai, V. Rachpech and S. Niyomwas “**Effect of Substrate Conditions on Fe- $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite Coating**”, Adv. Mat. Res., Vols. 488-489 (2012) pp 447-451
- S. Singarothai, V. Rachpech and S. Niyomwas “**A Study of Fe-based Composite Coating Fabricated by the Self-propagating High Temperature Synthesis**”, Adv. Mat. Res., Vols. 626 (2013) pp 138-142

## บรรณานุกรม

สิทธิชัย วิโรจน์ปลัมภ์.(2547), *เทคโนโลยีการพ่นเคลือบด้วยความร้อน*, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชวิช ชนะดี (2009), *การสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของวัสดุผสมไทเทเนียมไดโบไรด์ – มัลไลต์ โดยกระบวนการ SHS*, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุธรรม นียมवास.(2552), *การสังเคราะห์วัสดุอนินทรีย์*, หน่วยโสตทัศนศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

<http://www.grad.cmu.ac.th/gradresearch/fulltext/146.doc>, retrieved on 13 December , 2009

<http://www.5tigers.co.th/pdf/05Chapter03.pdf>, retrieved on 13 December , 2009

Moore, J. and Feng, H.(1995), “Combustion synthesis of advanced materials: Part I Reaction parameters”, *Prog. In Mater. Sci.*, 39, 243-273.

Seungwon, K., Moonhee, L., Taeyong N., and Chul, L.(1996), “Preparation of barium titanate by homogeneous precipitation”, *Journal of Materials Science*, 31, 3643-3645.

Zhang, J., Yin, Y., Li, J. and Zhang, H.(2003), “Fabrication and Properties of  $Fe_3Al-Al_2O_3$  graded coatings”, *Journal of Materials Processing Technology*, 206-209.

Tekmen, C., Yamazaki, M., Tsunekawa, Y. and Okumiya, M.(2008), “In-situ plasma spraying: Alumina formation and in-flight particle diagnostic”, *Surface & Coatings Technology*, 202, 4163-4169.

Kumar, S. and Selvarajan, V.(2006), “In-flight formation and characterization of nickel aluminide powders in a dc thermal plasma jet”, *Chemical Engineering and Processing*, 45, 1029-1035.

Ji, G., Elkedim, O. and Grosdidier, T.(2005), “Deposition and corrosion resistance of HVOF sprayed nanocrystalline iron aluminide coatings”, *Surface & Coatings Technology*, 190, 406-416.

- Dong, Y., Yan, D., He, J., Li, X., Feng, W. and Liu, H.(2004), “Studies on composite coatings prepared by plasma spraying  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Al self-reaction composite powders”, *Surface & Coatings Technology*, 179, 223-228.
- Wang, H., Huang, J., Zhu, J., Zhang, H. and Zhao, X.(2009), “Microstructure of cermet coating prepared by plasma spraying of Fe-Ti-C powder using sucrose as carbonaceous precursor”, *Journal of alloys and compounds*, 472, L1-L5.
- Li, Z., LIU, C., Huang, J. and Yin, S.(2003), “Synthesis and deposition of TiC-Fe coatings by oxygen acetylene flame spraying”, *J. Mater. Sci. Technol*, 192, 161-163.
- Liu, Y.H., Huang, H.J., Yin, F.C., Zhang, G.J. and Lin, B.G.(2007), “Microstructure and properties of TiC-Fe cermet coatings by reactive flame spraying using asphalt as carbonaceous precursor”, *Ceramics international*, 33, 827-835.
- Rotolico, A.J., and Saia, A.L., Maidhof, H.(1989). (The Perkin-Elmer Corporation), “High velocity powder thermal spray gun and method,” U. S. Patent 4,865,252, September 12, 1989.
- Rotolico, A.J.(1990). (The Perkin-Elmer Corporation), “Wire and powder thermal spray gun,” U. S. Patent 4,928,879, May 29, 1990.
- Upadhyaya, K. and Hill, Z.(2002). (Plasma technology, Inc.), “Thermal spray forming of a composite material having a particle-reinforced matrix,” U. S. Patent 6,436,480, August 20, 2002.
- Gokcen, N.A. and Reddy, R.G.(1996). *Thermodynamics*, Plenum Press, New York.
- Niyomwas, S., Chaichana, N., Memongkol, N., and Wannasin, J.(2008). “The effect of milling time on the synthesis of titanium diboride powder by self-propagating high temperature synthesis”, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 30, 233-238.
- Yuan, X., Lui G., Jin H., and Chen K.(2011). “In situ synthesis of TiC reinforced metal matrix composite (MMC) coating by self propagating high temperature synthesis (SHS)”, *Journal of alloys and compounds*, 509, L301-L303.
- Niu M., Bi Q., Kong L., Yang J., and Liu W.(2011) “A study of Ni<sub>3</sub>Si-based composite coating fabricated by self - propagating high temperature synthesis casting route”, *Surface&Coatings Tchnology*, 205, 4249-4253.